

TRABAJO FIN DE GRADO

Estudio de las posibles variables a modificar para reducir las tensiones residuales durante la operación de trefilado y adopción de un sistema de medida para medir las mismas.



Study of possible variables to be modified to reduce residual stresses during the drawing operation and adoption of a measurement system to measure them.

Autor: Pablo Quevedo Belmonte

Tutor: Jesús Setién Marquínez

Convocatoria: Julio 2020

INDICE

1	INTRODUCCIÓN	6
1.1	RESUMEN/ ABSTRACT	6
1.2	OBJETIVOS.....	8
1.3	INTERÉS INDUSTRIAL DEL PROYECTO	8
1.4	BREVE HISTORIA DE LA EMPRESA	9
2	ESTADO DEL ARTE.....	11
2.1	EL TREFILADO	11
2.1.1	DEFORMACIÓN ESTRUCTURAL POR TREFILADO	11
2.1.2	GRADO DE DEFORMACIÓN	14
2.1.3	VARIACIONES DE LAS CARACTERÍSTICAS MECÁNICAS EN FUNCIÓN DEL GRADO DE DEFORMACIÓN.....	15
2.1.4	INFLUENCIA DE LOS FACTORES SECUNDARIOS SOBRE LA VARIACIÓN DE LAS CARACTERÍSTICAS MECÁNICAS	19
2.1.5	MATERIAL UTILIZADO EN EL TREFILADO	20
2.1.6	CAPACIDAD DE TREFILADO	22
2.1.7	LUBRICACIÓN EN LA MÁQUINA DE TREFILAR	22
2.1.8	COMPONENTES GENERALES DE LA MÁQUINA DE TREFILAR.....	24
2.2	PROCESOS PREVIOS AL TREFILADO	29
2.2.1	DECAPADO QUÍMICO.....	29
2.2.2	TREFILADO DE PREPARACIÓN	30
2.2.3	PATENTADO.....	30
2.3	TENSIONES RESIDUALES	30

Estudio de las posibles variables a modificar para reducir las tensiones residuales durante la operación de trefilado y adopción de un sistema de medida para medir las mismas.

2.3.1	DEFINICIÓN.....	30
2.3.2	ORIGEN DE LAS TENSIONES RESIDUALES.....	31
2.3.3	MÉTODOS PARA MEDIR TENSIONES RESIDUALES.....	32
2.3.4	MÉTODOS PARA REDUCIR LAS TENSIONES RESIDUALES.....	36
3	METODOLOGÍA	41
3.1	REVISIÓN DE LOS MÉTODOS DE MEDICIÓN DE TENSIONES RESIDUALES	41
3.1.1	ENSAYO DE TRACCIÓN	41
3.1.2	ENSAYO DE RELAJACIÓN	41
3.1.3	DIFRACCIÓN DE RAYOS X	42
3.1.4	CONCLUSIÓN DE LA REVISIÓN DE LOS MÉTODOS DE MEDICIÓN	42
3.2	REVISIÓN DE LOS MÉTODOS PARA REDUCIR LAS TENSIONES RESIDUALES ..	43
3.2.1	DISMINUCIÓN DE LA VELOCIDAD DE TREFILADO.....	43
3.2.2	VARIACIÓN DE LA LONGITUD DE SALIDA.....	43
3.2.3	ÚLTIMA HILERA CON REDUCCIÓN MÍNIMA.....	43
3.2.4	MANTENIMIENTO DE LA TEMPERATURA CONSTANTE DURANTE EL PROCESO.....	44
3.2.5	VARIACIÓN EN EL ÁNGULO DE ENTRADA DE LA HILERA	44
3.2.6	TRATAMIENTO TÉRMICO O RECOCIDO	45
3.2.7	VIBRADO DEL MATERIAL	45
3.2.8	PATENTADO.....	45
3.2.9	CONCLUSIONES DE LA REVISIÓN DE LOS MÉTODOS PARA REDUCIR LAS TENSIONES RESIDUALES	46
3.3	VALORACIÓN DEL MÉTODO DE CONTROL ELEGIDO (ENSAYO A TRACCIÓN)	46

3.3.1	ENSAYOS DE MATERIAL DE CALDERA O LÍNEA DE PATENTADO (SIN TENSIONES RESIDUALES)	47
3.3.2	ENSAYOS DE MATERIAL DE CALDERA SIN PATENTAR (CON TENSIONES RESIDUALES)	49
3.3.3	ENSAYOS DE MATERIAL TREFILADO (CON TENSIONES RESIDUALES).....	50
3.4	VALORACIÓN DE LA VARIACIÓN ELEGIDA EN EL PROCESO DE PRODUCCIÓN ELEGIDO PARA REDUCIR LAS TENSIONES RESIDUALES (VARIACIÓN EN EL ÁNGULO DE ENTRADA DE LA HILERA).....	51
3.4.1	ENSAYO DE LOS DISTINTOS PROCESOS.....	51
4	RESULTADOS	53
4.1	RESULTADOS DEL MÉTODO DE MEDICIÓN DE LAS TENSIONES RESIDUALES.	53
4.1.1	ENSAYOS PROBETAS DE LA CALDERA PATENTADO	53
4.1.2	ENSAYOS PROBETAS GALVANIZADAS SIN PATENTAR.	58
4.1.3	ENSAYOS PROBETAS MATERIAL TREFILADO.	60
4.2	RESULTADOS MÉTODO DE REDUCCIÓN DE LAS TENSIONES RESIDUALES.	62
4.2.1	PROCESO A	62
4.2.2	PROCESO B	65
4.2.3	PROCESO C	67
5	ANÁLISIS DE RESULTADOS	70
5.1	ANÁLISIS DEL MÉTODO DE MEDICIÓN	70
5.1.1	MUESTRAS DE PATENTADO	70
5.1.2	MUESTRAS SIN PATENTAR	71
5.1.3	MATERIAL TREFILADO.....	72
5.2	ANÁLISIS DEL MÉTODO DE REDUCCIÓN DE TENSIONES RESIDUALES.....	73

Estudio de las posibles variables a modificar para reducir las tensiones residuales durante la operación de trefilado y adopción de un sistema de medida para medir las mismas.

5.2.1	PROCESO A	73
5.2.2	PROCESO B	74
5.2.3	PROCESO C	75
6	CONCLUSIONES	77
7	BIBLIOGRAFÍA	79
8	ANEXOS	80
8.1	EVALUACIÓN DE RIESGOS GENERALES EN LOS LUGARES DE TRABAJO	80
8.1.1	RIESGOS LABORALES Y SUS CAUSAS	80
8.2	MEDIDAS GENERALES DE PROTECCIÓN EN MÁQUINAS	80
8.2.1	RIESGOS LABORALES Y SUS CAUSAS	81
8.3	EVALUACIÓN DE LA EXPOSICIÓN AL RUIDO	82
8.4	HERRAMIENTAS MANUALES	82
8.4.1	RIESGOS LABORALES Y SUS CAUSAS	83
8.5	MANIPULACIÓN DE LAS CARGAS	83
8.5.1	RIESGOS LABORALES Y SUS CAUSAS	83
8.6	RIESGO ELÉCTRICO	84
8.6.1	RIESGOS LABORALES Y SUS CAUSAS	85
8.7	RIESGO DE INCENDIO	85
8.8	CONTAMINANTES QUÍMICOS.....	86
8.9	TRABAJO A TURNOS Y NOCTURNO	87
8.10	EQUIPOS DE PROTECCIÓN INDIVIDUAL (EPIS).....	88
8.11	SEÑALIZACIÓN DE SEGURIDAD Y SALUD	89

8.12	MEDIDAS DE EMERGENCIA Y PRIMEROS AUXILIOS.....	90
-------------	---	-----------

Estudio de las posibles variables a modificar para reducir las tensiones residuales durante la operación de trefilado y adopción de un sistema de medida para medir las mismas.

1 INTRODUCCIÓN

Durante la realización de las prácticas extracurriculares en la empresa Trefilerías Quijano, perteneciente al Grupo Celsa, se plantea la necesidad de disminuir las tensiones residuales que se generan en el alambre de acero trefilado, más concretamente en los aceros duros a la hora de trefilar en máquina.

El proceso de trefilado consiste básicamente en reducir el diámetro del alambre mediante el paso consecutivo a través de diferentes hileras por estirado en frío. De este modo el alambre aumenta de forma notable su resistencia a tracción.

Las tensiones residuales que se inducen durante este proceso, influyen negativamente en el comportamiento mecánico del alambre y en su durabilidad, lo cual crea un rechazo por parte de algunos clientes a la hora de manipular el producto final, por lo que se ha decidido estudiar el problema y plantear una propuesta como posible solución.

Para ello se realizará una revisión del estado de operación actual y se valorarán todas las opciones que se presentan como hipotética solución. Por un lado, se hará una valoración de los métodos de medición posibles y por otro se analizarán las posibles variaciones a realizar en el proceso de producción. Una vez que se escoja la o las opciones que mejor se adapten al proceso productivo, se comenzará a realizar ensayos comprobando así la eficacia de la opción elegida.

Una vez que se tenga la solución definitiva a implantar se realizarán pruebas en aceros de todas las calidades y diferentes diámetros para corroborar que la solución a implantar es la adecuada.

1.1 RESUMEN/ ABSTRACT

RESUMEN

Este trabajo de fin de grado se basa en un estudio para poder combatir o disminuir un problema, que se ha planteado en la empresa en la cual se han realizado las prácticas extracurriculares (Trefilerías Quijano), en este caso una serie de clientes encuentran determinadas inconformidades a la hora de materializar los resortes con el material proveniente de la empresa citada.

Una vez analizado el problema planteado en el laboratorio por la plantilla y a partir de una serie de reuniones con los responsables de los distintos departamentos que

intervienen en el proceso productivo, se llega a la conclusión de que el problema se debe a las tensiones internas generadas durante la operación de trefilado.

Por ello se plantea el trabajo como la búsqueda de una hipotética solución al problema existente, para ello el primer paso ha sido valorar una serie de métodos a partir de los cuales se pueden medir las tensiones residuales por medio de distintos mecanismos.

Una vez valorados todos los métodos se realiza una reunión para adoptar la mejor metodología.

En segundo lugar y una vez que podemos medir las tensiones residuales y comprobar su existencia, se valoran las diferentes variables que se pueden modificar dentro del proceso de trefilado analizando cada una de ellas y escogiendo aquella que a priori parece ser la mejor opción.

Tras adoptar el método de medición elegido y la variable a modificar se prueba la eficacia de las opciones seleccionadas a través de distintos ensayos realizados en el laboratorio.

Por último, una vez que se conocen los resultados arrojados por los ensayos realizados, estos son analizados y se elaboran una serie de conclusiones.

ABSTRACT

This final degree project is based on a study to be able to combat or reduce a problem, which has arisen in the company in which the extracurricular practices have been carried out (Trefilerías Quijano), in this case a series of clients find certain nonconformities when materializing the springs with the material from the aforementioned company.

After analyzing the problem raised in the laboratory by the staff and from a series of meetings with the heads of the different departments involved in the production process, it is concluded that the problem is due to internal tensions generated during the drawing operation.

For this reason, the work is proposed as the search for a hypothetical solution to the existing problem, for this the first step has been to assess a series of methods from which the residual stresses can be measured by means of different mechanisms.

Once all the methods have been evaluated, a meeting is held to adopt the best methodology.

Estudio de las posibles variables a modificar para reducir las tensiones residuales durante la operación de trefilado y adopción de un sistema de medida para medir las mismas.

Secondly, and once we can measure the residual stresses and verify their existence, the different variables that can be modified within the drawing process are evaluated, analyzing each of them and choosing the one that a priori seems to be the best option.

After adopting the chosen measurement method and the variable to be modified, the effectiveness of the selected options is tested through different tests carried out in the laboratory.

Finally, once the results of the tests carried out are known, they are analyzed and a series of conclusions are drawn

1.2 OBJETIVOS

El objetivo principal de este estudio es plantear una hipotética solución al problema planteado y que en un futuro pueda servir como utilidad en el proceso de producción.

Otro de los objetivos es conocer de forma más detallada el comportamiento de las tensiones residuales durante el trefilado.

Para ello en primer lugar se estudiará la situación actual en la que se encuentra el sistema de producción y a partir de ahí se realizarán distintas pruebas analizando los resultados obtenidos para poder llegar a una conclusión positiva.

1.3 INTERÉS INDUSTRIAL DEL PROYECTO

A lo largo de los años se han realizado modificaciones tanto en las máquinas de trefilado como en el proceso de trefilado en sí, obteniéndose resultados satisfactorios los cuales mejoran la calidad del producto final proporcionando un mayor auge en el mercado del alambre.

Se sabe de la existencia de las tensiones residuales en el alambre hace varios años, pero el paso del tiempo ha hecho que las exigencias de calidad existentes en la actualidad sean cada vez mayores; por otro lado, se han detectado algunos fallos producidos por la existencia de las tensiones residuales en el producto final e incluso a la hora de utilizar el material en determinadas estructuras, es por ello que las tensiones residuales han pasado a tener un papel más relevante en la actualidad.

Por este motivo, se hace necesario un estudio detallado de las tensiones residuales, sus efectos y las causas que las provocan, de cara a proponer alguna solución que pueda paliar en cierta medida la incidencia negativa que tienen en el producto final.

No es tarea fácil alcanzar el objetivo fijado, debido a que un mismo material puede presentar un problema para algún cliente que lo utiliza en la fabricación de un determinado producto, mientras que para otros clientes puede pasar desapercibido debido a que la utilización de dicho material no genera un problema en ese aspecto. Por ello se ha acordado trabajar con aquellos clientes que pueden detectar el problema y proponer una solución, que como ventaja será también bienvenida por aquellos que no detectan dicho problema o que en su defecto a ellos no les supone una merma en la calidad final del producto.

1.4 BREVE HISTORIA DE LA EMPRESA

Trefilerías Quijano es la heredera de “Puntas de Paris” la cual fue creada por D. José María Quijano en 1873 y se encuentra ubicada en Los Corrales de Buelna a orillas del río Besaya.

Durante sucesivas etapas se fue integrando en el proceso industrial la fabricación del alambre y posteriormente hasta el mismo acero. De igual forma, la gama de productos se extendía simultáneamente y ya en 1914 la S.A. José María Quijano estaba presente en todas las aplicaciones del alambre y de sus derivados.

Hacia 1940 la empresa comienza una diversificación de negocio, sin abandonar el alambre, hacia la industria mecánica del automóvil. En 1969 logra un nuevo hito en cuanto a la capacidad y el volumen de tonelaje trefilado, situación que marca un elemento diferenciador con respecto al resto de trefilerías nacionales.

Aproximadamente 20 años más tarde, en 1987 el Grupo Celsa se interesa por la empresa convirtiéndola en Trefilerías Quijano S.A., nombre que actualmente la representa y que desde entonces se ha ido convirtiendo en referente en el sector de la trefilería.

En 1988 la compañía se divide en dos entidades separadas, una para fabricación de alambrón, en Santander, y la otra Trefilerías Quijano, dedicada a la fabricación de alambres de acero, cordones y derivados del alambre.

Finalmente, se puede destacar como un hito clave de nuestra trayectoria el año 1999, en el que se inicia la andadura en el proceso de estampación en frío, el cual juega un importante papel en la actualidad.

Estudio de las posibles variables a modificar para reducir las tensiones residuales durante la operación de trefilado y adopción de un sistema de medida para medir las mismas.



Figura 1. Vista aérea actual del complejo Trefilerías Quijano en Los Corrales de Buelna.

2 ESTADO DEL ARTE

2.1 EL TREFILADO

El estire o trefilado es una operación que consiste en alargar un material haciéndolo pasar a través de un orificio situado en un utensilio llamado hilera. El producto obtenido con el trefilado queda reducido de sección transversal y cualquiera que fuese su composición inicial, recibe el nombre genérico de alambre.

En el estire por trefilado en hilera se realiza una reducción constante y el esfuerzo de tracción debe vencer además la resistencia a la deformación del propio alambre. El producto obtenido normalmente tiene la superficie lisa, es de sección transversal uniforme y sus dimensiones pueden ser prefijadas con la máxima facilidad y precisión. Todo material que vaya a ser trefilado debe tener la característica de ser dúctil. La ductilidad es una propiedad que tienen algunos materiales, en general los metales, en los cuales las partículas que los forman pueden ser desplazadas unas con respecto a las otras bajo esfuerzo, gracias a que mantienen la cohesión mutua y confiere al material la capacidad de deformarse plásticamente.

El trefilado introduce en el alambre un progresivo endurecimiento, (llamado endurecimiento por deformación o por trabajo) acompañado de una modificación general de la mayor parte de sus propiedades (se dice habitualmente que el metal adquiere acritud). Las que más varían, y por otra parte las más importantes desde el punto de vista de utilización posterior del alambre, son las propiedades mecánicas: la resistencia a la tracción, el alargamiento, el límite elástico y la dureza.

Todas estas variaciones en las características del alambre son debidas a las modificaciones de su estructura cristalina, ligada a la estructura atómica particular de los componentes del metal que se trefila. (1)

2.1.1 DEFORMACIÓN ESTRUCTURAL POR TREFILADO

2.1.1.1 *Estructura del acero laminado*

El redondo procedente del taller de laminación en caliente está constituido por un agregado de masas cristalinas llamadas granos. Estos granos, cuyas dimensiones son prácticamente las mismas en todas las direcciones (equiaxialidad), están limitados no por caras sino por juntas irregulares llamadas bordes o fronteras de grano) (Fig. 2).

Estudio de las posibles variables a modificar para reducir las tensiones residuales durante la operación de trefilado y adopción de un sistema de medida para medir las mismas.

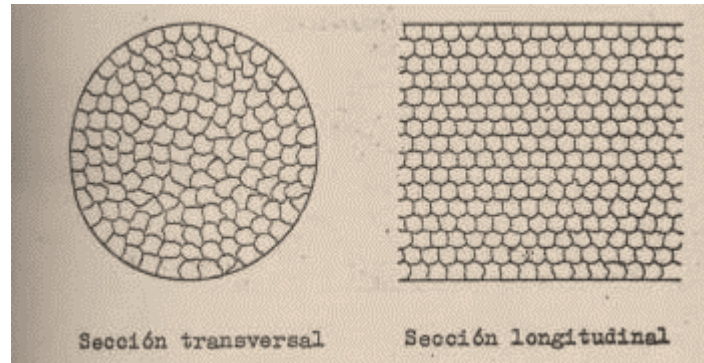


Figura 2. Sección transversal y sección longitudinal de la distribución interna de los granos del acero sin modificar.

La sección de rotura de un redondo laminado no presenta partes cristalinas y brillantes sino que presenta un aspecto grisáceo debido a que la rotura se ha producido en el interior de los granos (rotura transgranular).

2.1.1.2 *Estrechamiento y alargamiento de los granos*

La estructura interna del material después de algunas pasadas por hileras sucesivas, tendrá una sección transversal más pequeña y unos granos más alargados en su sección longitudinal. Esta deformación será progresiva, estrechándose más los granos en la sección perpendicular a la dirección del estire y alargándose aún más en el sentido del estire a medida que la reducción total va siendo mayor, ya que en régimen plástico se debe preservar la conservación del volumen (isovolumen). Fig 3 (Reducción del 50%), Fig. 4 (Reducción del 75%)

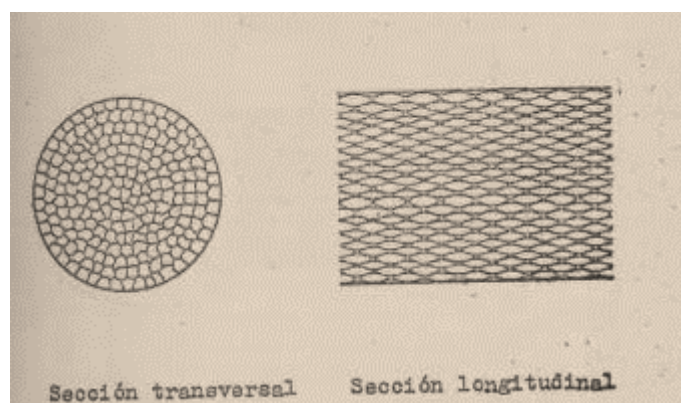


Figura 3. Sección transversal y sección longitudinal de la distribución interna de los granos del acero tras sufrir un estire y una reducción de sección del 50%.

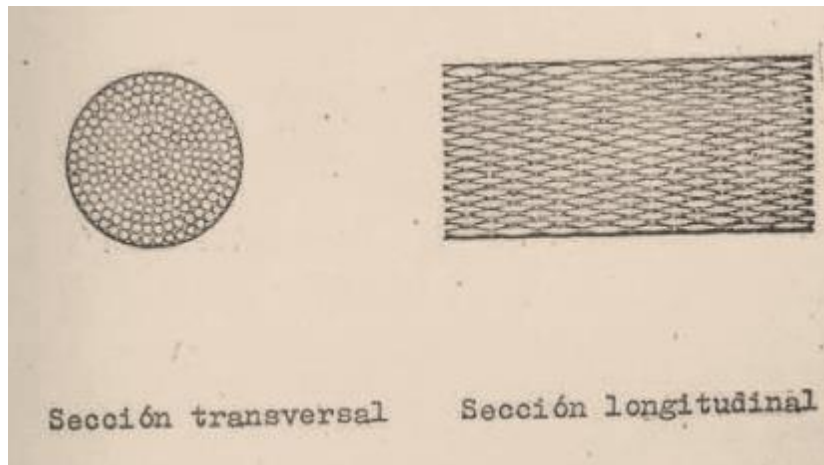


Figura 4. Sección transversal y sección longitudinal de la distribución interna de los granos del acero tras sufrir un estire y una reducción de sección del 75%.

El alambre de acero al ser trefilado pasa, por tanto, de una estructura granular a una más fibrosa.

A medida que el acero se va deformando es más difícil reconocer las juntas de los granos, que resultan muy difuminadas

2.1.1.3 Retardo de los granos periféricos respecto a los centrales

La compresión que se produce al trefilar provoca un atraso en el avance de los estratos externos del alambre respecto a los internos (Fig. 5).

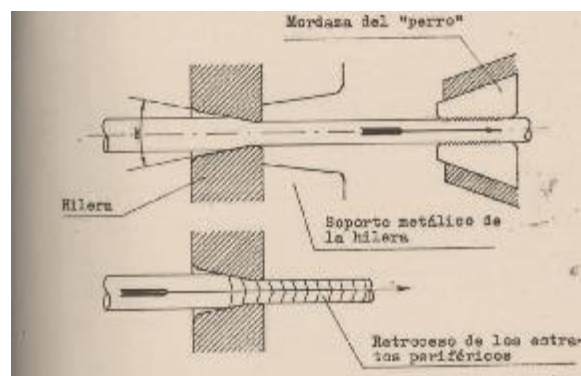


Figura 5. Esquema de trefilado en el que se observa el paso del alambre por la hilera y el cambio de sección que se genera.

Este retardo depende en gran medida de la conicidad de la hilera, de las condiciones de lubricación, del tanto por ciento de reducción de la sección y sobre todo del número de pasadas para una misma reducción total. Se observa un mayor atraso periférico,

Estudio de las posibles variables a modificar para reducir las tensiones residuales durante la operación de trefilado y adopción de un sistema de medida para medir las mismas.

para un mismo porcentaje de reducción total de sección, cuando se dan muchas y suaves pasadas que cuando se dan pocas y fuertes (Fig. 6)

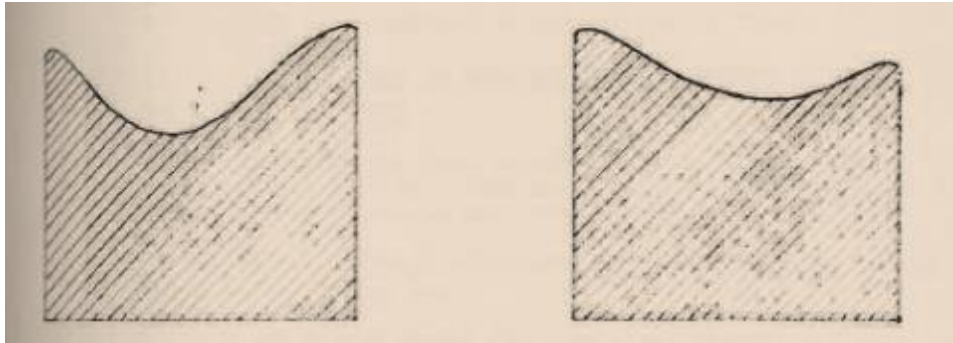


Figura 6. Corte longitudinal en el extremo inicial (punta) y extremo final (cola) de un alambre trefilado de Ø5 a Ø3.5, tras 7 pasadas por hileras consecutivas.

2.1.2 GRADO DE DEFORMACIÓN

El grado de deformación se entiende como la reducción de sección transversal relativa. Se desarrolló una fórmula para expresar el tanto por ciento de reducción de la sección (estricción).

$$\left(\frac{S_0 - S_1}{S_0}\right) \times 100$$

En esta fórmula el S_0 es el área de la sección inicial expresada en mm^2 y S_1 es el área de la sección transversal final expresada también en mm^2 . El valor total que resulta de esta fórmula nunca puede pasar de 100. (2)

Para expresar el tanto por ciento de elongación por trefilado se definió la siguiente fórmula:

$$\left(\frac{S_0 - S_1}{S_1}\right) \times 100$$

Se utiliza el término tanto por ciento de elongación en lugar de alargamiento para no confundirlo con el porcentaje de alargamiento que sufre un alambre en las pruebas y ensayos mecánicos de tracción.

El porcentaje de elongación en teoría podría llegar a valores infinitos en un metal que tuviese una ductilidad perfecta. En la práctica de trefilería es muy corriente alcanzar valores de orden de 2.000 a 3.000.

Tabla 1. **Relación entre porcentaje de reducción y porcentaje de elongación durante la operación de trefilado**

$\left(\frac{S_0 - S_1}{S_0}\right) \times 100$	$\left(\frac{S_0 - S_1}{S_1}\right) \times 100$	D_1/D_0
10	11	0.95
20	25	0.89
30	43	0.84
40	66	0.77
50	100	0.74
60	150	0.63
70	233	0.55
75	300	0.5
80	400	0.45
85	566	0.39
90	900	0.32
95	1000	0.22
98	4900	0.14

2.1.3 VARIACIONES DE LAS CARACTERÍSTICAS MECÁNICAS EN FUNCIÓN DEL GRADO DE DEFORMACIÓN

Estudio de las posibles variables a modificar para reducir las tensiones residuales durante la operación de trefilado y adopción de un sistema de medida para medir las mismas.

Tabla 2. Relación entre la reducción total resultante tras varias pasadas a distintos porcentajes de reducción

%	2	3	4	5	6	7
10	19	27	35	41	47	52
11	21	30	37	45	51	56
12	23	32	40	48	54	59
13	25	34	43	50	57	62
14	27	37	46	54	60	65
15	28	39	48	55	62	68
16	30	41	50	58	65	73
17	31	43	53	61	68	74
18	33	45	55	63	70	75
19	35	47	57	65	72	77
20	36	49	59	67	74	79
21	38	51	61	69	76	81
22	39	52	63	71	77	82
23	41	54	65	73	79	84
24	42	56	66	74	80	85
25	44	58	68	76	82	86.5
26	45	60	70	78	84	88
27	47	61	71	79	85	89
28	48	63	73	80	86	90
29	48	64	74	81	87	91
30	49	65	75	82	88	91.5

Como se puede observar en la Tabla 2, dos pasadas de 20% de reducción parcial cada una representa una reducción total del 36% y no del 40% como parecería en principio. Si se realizan tres pasadas del 20% se obtiene una reducción total del 49%. Y con cuatro pasadas del 25% de reducción parcial cada una se logra una reducción total del 68%.

2.1.3.1 Variación de la resistencia a tracción

A medida que el alambre se va estirando, la resistencia a tracción va aumentando de manera gradual a consecuencia del endurecimiento que experimenta el material.

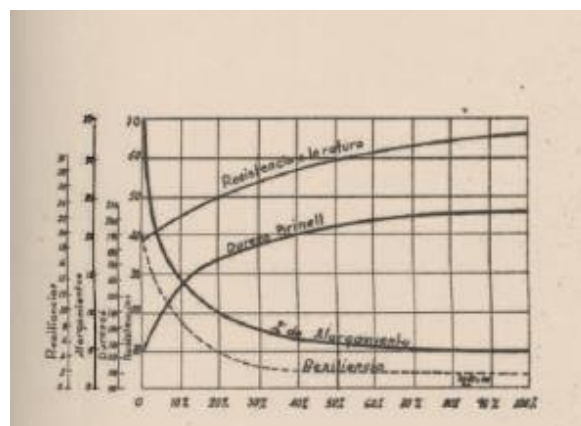


Figura 7. Influencia de la deformación en las propiedades mecánicas del acero suave.

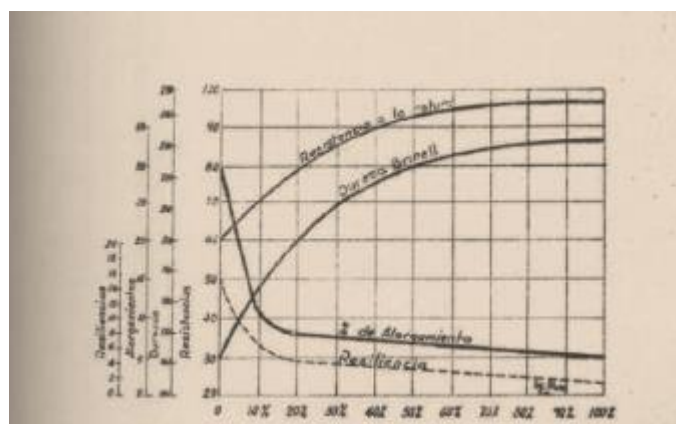


Figura 8. Influencia de la deformación sobre las propiedades mecánicas de un acero semi-duro.

Estudio de las posibles variables a modificar para reducir las tensiones residuales durante la operación de trefilado y adopción de un sistema de medida para medir las mismas.

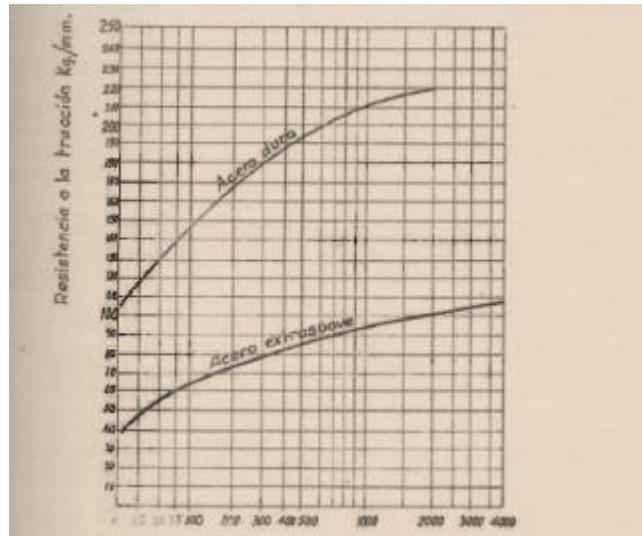


Figura 9. Representación de las variaciones de la resistencia a tracción de alambres de aceros suaves y duros en función del porcentaje de elongación por trefilado.

El aumento de resistencia es sobre todo muy destacable en la primera pasada, siendo mucho menos notable en las pasadas sucesivas.

Después de muchas experiencias con aceros suaves y duros ha demostrado que: Cuanto más grandes son las deformaciones, mayor es la elevación de la temperatura del alambre y mayor en general el aumento de la resistencia por mm^2 . Esta elevación de temperatura sería más grande, para una misma deformación, en el trefilado de aceros muy carburados que si se trefilan aceros suaves. (2)

2.1.3.2 Variación del porcentaje de alargamiento y del porcentaje de estricción en los ensayos de tracción en función de la deformación sufrida por el alambre

Mientras el alargamiento prácticamente desaparece casi totalmente después de la primera pasada, la estricción no decrece más que poco a poco en cada una de las sucesivas pasadas.

En aceros suaves con estricción inicial de 50 tras varias pasadas se alcanza hasta un 20. Sin embargo, en aceros duros con una estricción inicial de 25-35 al tener muchas pasadas o no decrece o incluso aumenta, al contrario que en los aceros suaves.

Cuando se parte de alambres de acero duro que han sido patentados previamente para conseguir una mayor tenacidad, menor fragilidad y la posibilidad de ser trefilados hasta

límites más extensos. Por el contrario, cuando se parte de alambres sin patentar, aunque el porcentaje de alargamiento y el porcentaje de estricción suelen tener valores iniciales superiores a los mismos alambres tratados, estos porcentajes van cayendo rápidamente en las sucesivas pasadas hasta llegar a valores muy bajos, con lo cual es imposible obtener mucha reducción de sección por trefilado ya que el alambre es frágil y se rompe.

2.1.3.3 *Variación del límite elástico*

El aumento del límite elástico suele ser superior en los aceros más carburados que en los suaves de acuerdo con el práctico paralelismo que existe entre las curvas que los representan y las de resistencias.

Una forma de aumentar el límite elástico por encima del valor obtenido por trefilado es la de dejar transcurrir un intervalo lardo largo de tiempo entre las operaciones de trefilado y los ensayos mecánicos. A esta operación de dejar pasar un período grande de tiempo se le denomina comúnmente “envejecimiento”. Con este proceso se logra un cierto reagrupamiento (recuperación) de los microgramos deformados durante la operación de trefilado.

En el caso de un envejecimiento artificial por calentamiento, la temperatura a que se debe someter el alambre dependerá de factores como: el grado de deformación y la composición química. En realidad, la consecuencia del tratamiento térmico habrá sido una disminución de las llamadas “tensiones internas” creadas por el trefilado. (2)

2.1.4 **INFLUENCIA DE LOS FACTORES SECUNDARIOS SOBRE LA VARIACIÓN DE LAS CARACTERÍSTICAS MECÁNICAS**

2.1.4.1 *Influencia del sentido de trefilado.*

Dependiendo del sentido de trefilado las capas exteriores quedan retardadas respecto a las situadas en el núcleo del alambre.

Bonzel llevo a cabo las siguientes pruebas con alambres de acero suave:

- a) Trefilado de alambre en 10 pasadas todas en un mismo sentido.
- b) Trefilado de alambre en 10 pasadas con la misma reducción parcial en cada una de ellas, pero alternando en cada pasada el principio y el fin de cada rollo.

Estudio de las posibles variables a modificar para reducir las tensiones residuales durante la operación de trefilado y adopción de un sistema de medida para medir las mismas.

Tras estas dos series de prueba se compararon los dos tipos de alambre obtenidos constatándose que no existía diferencia alguna apreciable en ninguna de sus características.

Por esto afirmó que el sentido de trefilado no tiene influencia alguna sobre la calidad de los alambres.

2.1.4.2 Influencia repartición de las pasadas.

El número de pasadas dependerá de los diámetros de entrada y salida, normalmente se calcula con una fórmula que indica el número de hileras por las que debe pasar el alambre para mantener el porcentaje de reducción que se quiera establecer en cada pasada.

2.1.4.3 Influencia de la velocidad de trefilado.

Generalmente el trefilado se realiza a altas velocidades, del orden de varios metros por segundo. En las máquinas en las que se trabaja el acero duro, la velocidad de paso por cada hilera irá aumentando conforme se reduce la sección del alambre.

2.1.5 MATERIAL UTILIZADO EN EL TREFILADO

En la industria del trefilado los aceros más utilizados son los aceros eutectoides, que son aquellos en los que el contenido en Carbono está próximo al 0.77%, conocida ésta como composición del eutectoide (Fig. 10).

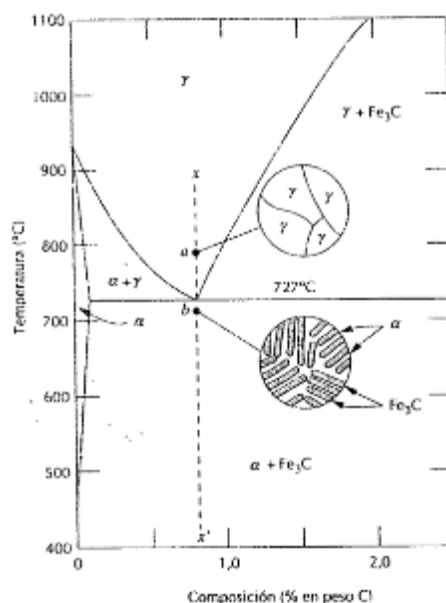


Figura 10. Fases del acero según el contenido en Carbono y las variaciones de temperatura.

C%	Mn%	Si%	P%	S%	Cr%	Ni%	Mo%	Cu%	V%
0.77	0.69	0.22	0.010	0.024	0.239	0.076	0.010	0.129	0.118

Tabla 3. Composición de un acero real utilizado como material de partida antes de entrar a trefilar, el cual dará lugar a alambre para pretensar.

Inicialmente la microestructura de la fase γ (austenita) es muy sencilla, con granos orientados al azar. Al enfriar se desarrollan las dos fases sólidas Fe- α (ferrita) y cementita (carburo de hierro, Fe_3C). Esta transformación de fases, llamada eutectoide, necesita la diferenciación del carbono ya que las tres fases tienen composiciones diferentes. Para cada grano de austenita se forman dos fases con láminas de ferrita alternadas con otras de cementita y relación de fases de 9:1, respectivamente. Las orientaciones entre granos son al azar. Esta microestructura de ferrita y cementita se conoce como perlita derivando el nombre de la apariencia de madreperla que presenta esta fase cuando es observada bajo el microscopio. Mecánicamente, las perlitas tienen propiedades intermedias entre la blanda y dúctil ferrita y la dura y quebradiza cementita (Fig. 11). (3)

Estudio de las posibles variables a modificar para reducir las tensiones residuales durante la operación de trefilado y adopción de un sistema de medida para medir las mismas.



Figura 11. Microestructura perlítica de un acero eutectoide con láminas alternas de ferrita- α (fase clara) y cementita (fase oscura).

2.1.6 CAPACIDAD DE TREFILADO

Estudiando las características mecánicas de los alambres después de un elevado grado de deformación, se observa que, en general estas características sufren una alteración en sus valores iniciales. Algunas de estas alteraciones son: descenso del número de torsiones, descenso del número de flexiones y disminución del porcentaje de estricción. Sin embargo, no todas las características son afectadas simultáneamente ni en la misma proporción.

Para evitar alcanzar los límites anteriormente descritos, lo ideal sería poder determinar con un ensayo rápido la capacidad de trefilado de un acero laminado o de un alambre. Sin embargo, las condiciones en que se efectúa la deformación en la hilera, bajo esfuerzos combinados de tracción y compresión, son muy diferentes a las condiciones que corresponden a la rotura por tracción simple. Por ello es muy difícil e inseguro referirse a los valores obtenidos en un ensayo de tracción para intentar evaluar la capacidad de trefilado de un material cualquiera. (2)

2.1.7 LUBRICACIÓN EN LA MÁQUINA DE TREFILAR

La lubricación del alambre durante el trefilado tiene una importancia muy relevante. Durante el trefilado del alambre se producen unas presiones tan grandes que la mayoría de los lubricantes utilizados habitualmente en mecánica no podrían evitar un roce violento de las superficies en contacto; este roce se traduciría inmediatamente

en un calentamiento elevado de la hilera y en un rayado longitudinal del alambre, pudiendo llegar a un posible agrietamiento transversal del mismo.

2.1.7.1 Función de los lubricantes

Los lubricantes utilizados en trefilería buscan mantener una película de lubricante bien adherida a la superficie del alambre y que, a la vez, sea resistente a la rotura o a la destrucción. Las superficies del alambre y de la hilera, consideradas microscópicamente, y a pesar de estar teóricamente pulidas, son muy rugosas. Durante el proceso de trefilado, los puntos que hacen contacto de ambas superficies son los picos salientes de dichas superficies rugosas. La carga total recae sobre estos picos, en los que los esfuerzos son tan grandes que son suficientes para producir soldaduras locales. Como una de las superficies se mueve y la otra permanece quieta, aquellas soldaduras locales romperán, teniendo como resultado de ello un alambre con desgarros en su superficie.

La función principal del lubricante consiste en mantener separadas las dos superficies de forma que los picos no hagan contacto entre sí.

2.1.7.2 Consecuencias de una mala lubricación

Una mala lubricación puede producir un rozamiento excesivo entre el alambre y la hilera, por lo que en el proceso de trefilado lo ideal sería eliminar este frotamiento.

Este frotamiento inevitable aún en trefilería puede producir los siguientes efectos:

- Formación de asperezas en toda la superficie longitudinal del alambre.
- Formación de pequeñas áreas que presentan una planitud superior a la del resto de la superficie.
- Formación de pequeñas micro-soldaduras, las cuales han sido mencionadas anteriormente.

2.1.7.3 Características de los lubricantes utilizados en trefilería

La mayoría de los lubricantes utilizados en el estire de alambre están formados a base de aceites o grasas animales y vegetales los cuales, por su composición y por el ordenamiento de sus átomos, están constituidos por moléculas polares.

Esta característica los hace muy beneficiosos en cuanto a lubricación pura y sujeción al alambre, pero favorece en cambio su facilidad de ablandamiento o destrucción bajo condiciones de altas temperaturas o presiones, lo cual coincide con las condiciones que se suelen dar en el trefilado.

Estudio de las posibles variables a modificar para reducir las tensiones residuales durante la operación de trefilado y adopción de un sistema de medida para medir las mismas.

Es por ello que estos lubricantes suelen completarse con otras sustancias como la cal, con objeto de disminuir la capacidad de ablandamiento.

2.1.8 COMPONENTES GENERALES DE LA MÁQUINA DE TREFILAR

2.1.8.1 *El argadillo*

Este aparato tiene como misión permitir el desarrollo continuo y uniforme del rollo que va a ser trefilado sin que se produzcan trabaduras, tirones ni cualquier otro suceso que pudiese ser ocasión de rotura del alambre.

Se construye generalmente de hierro, aunque algunas veces cuando el argadillo deba ser sumergido en soluciones más o menos ácidas y cuando se trefilan alambres muy finos se pueden construir también de madera.

Es indispensable que las espiras se vayan desarrollando progresivamente cada una después de la anterior. Existen dos sistemas de argadillo, los argadillos giratorios y argadillos fijos.

Argadillos giratorios: Este tipo de argadillo es conveniente que gire lo más fácilmente posible sobre su eje, que suele ser vertical, debiéndose regular y uniformar, en cambio, la velocidad angular de rotación con algún dispositivo de frenado. Esta última observación hay que tenerla tanto más en cuenta cuanto mayor sea el peso del argadillo y el rollo y mayor el número de brazos de que conste, así como también cuanto más enredadas estén las vueltas. Este tipo de argadillo es necesario utilizarlo siempre para trefilar alambres gruesos de acero duro, pero se puede utilizar también para alambres finos y de baja carburación.

Argadillos fijos: Cuando se trefilan alambres de acero suave o diámetros pequeños de acero duro se utiliza un tipo distinto de argadillo llamado argadillo fijo. Estos argadillos no son giratorios, en ellos las vueltas del rollo se van deslizando sobre los brazos y van desarrollándose consecutivamente.

Estos argadillos presentan como ventaja, respecto a los giratorios, la posibilidad de soldar varios rollos en ellos y ser por lo tanto más aconsejables para trabajar con modernas máquinas de alta velocidad de trefilado, si es que la naturaleza del alambre permite emplearlos. Tampoco se plantean con estos argadillos los problemas producidos por la inercia que acompaña a los estirones violentos en los argadillos giratorios. Sin embargo, no todo son ventajas; por cada espira que se desenrolla el alambre sufre una torsión completa.

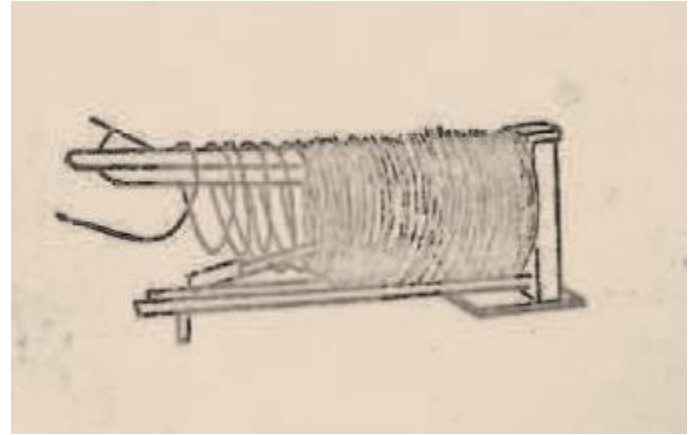
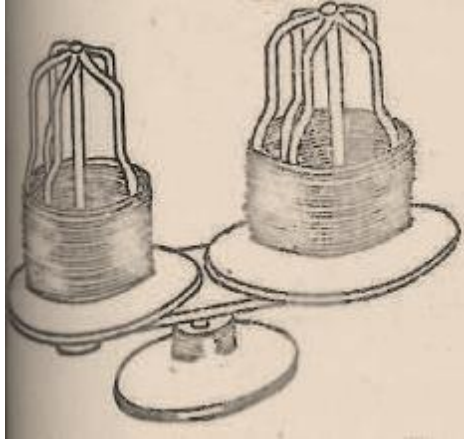


Figura 12. Argadillo giratorio (Imagen izquierda) y argadillo fijo (Imagen derecha), su utilización depende de la máquina de trefilar y del diámetro del material de entrada.

2.1.8.2 El portahileras

Este elemento posee tres misiones importantes:

- Sujetar la hilera: El portahileras debe ejercer como elemento de sujeción para contrarrestar la fuerza que ejerce la bobina sobre el alambre durante el estire.

Esta misión obliga a que el portahileras esté construido de manera robusta y esté fuertemente fijado a la máquina. El modelo del portahileras variará dependiendo del tipo de hilera empleado. El modelo también dependerá del tipo de refrigeración de hilera utilizado.

Además de estar construido robustamente, el portahileras debe tener la propiedad de ser fácilmente desmontable y limpiable.

- Orientarla en el plano horizontal: Para ello el portahileras debe disponer de tornillos u otros dispositivos de reglaje que permitan orientarle y fijarle a la máquina según considere el operario.

Esta posibilidad de regulación deberá ser más importante cuanto menor sea el diámetro de alambre, ya que la relación diámetro bobina vs. diámetro del alambre se hace más grande al disminuir el denominador. (2)

Estudio de las posibles variables a modificar para reducir las tensiones residuales durante la operación de trefilado y adopción de un sistema de medida para medir las mismas.

- Contener el jabón y procurar una buena lubricación, cuando se trefila con lubricantes sólidos: Con esto se pretende contener los polvos de lubricación en un depósito llamado jabonero. Este jabonero suele a veces disponer de dispositivos que sirven para homogenizar y controlar la lubricación del alambre y de la hilera.

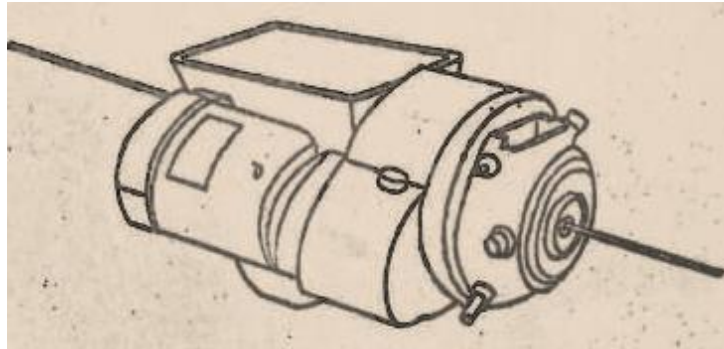


Figura 13. **Portahileras común con su jabonero correspondiente.**

2.1.8.3 *El perro*

La extremidad del alambre correspondiente al comienzo del rollo debe ser rebajada de diámetro para que pueda ser introducida en la primera hilera, a esta operación se la denomina enhebrar la hilera. Una vez que la punta ha sido enhebrada se fija a la bobina en el momento en el que esta ha sido puesta en marcha.

Esta sujeción y posterior tirón del extremo del rollo hacia la bobina, efectuados para lograr que las primeras vueltas trefiladas queden bien arrolladas, se ejecutan utilizando el dispositivo de agarre llamado perro. (2)

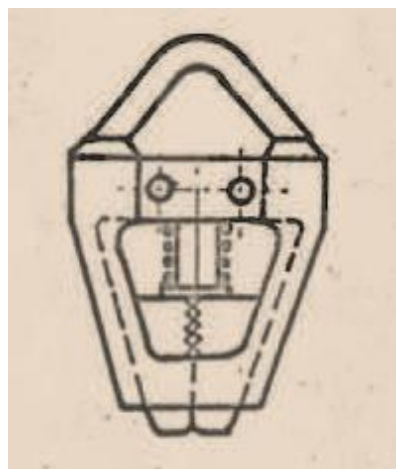


Figura 14. **Perro utilizado normalmente en la empresa Trefilerías Quijano.**

2.1.8.4 La bobina

En trefilería generalmente se utilizan tres tipos de bobinas diferentes:

Bobina de caza: Es el tipo más empleado de los tres, generalmente consta de un eje vertical sobre el cual gira un cilindro, ligeramente cónico hacia arriba (Fig. 12). En la parte inferior se continúa esa superficie cónica en otra también cónica de mayor diámetro, mecanizada de tal forma que al enrollarse sobre esa parte inferior el alambre, las espiras se disponen de manera regular unas detrás de otras, cazando así cada nueva espira a la precedente que va desplazando a las anteriores hacia arriba.

La conicidad y la altura de la caza dependen principalmente del diámetro del alambre y de la fuerza de estire.

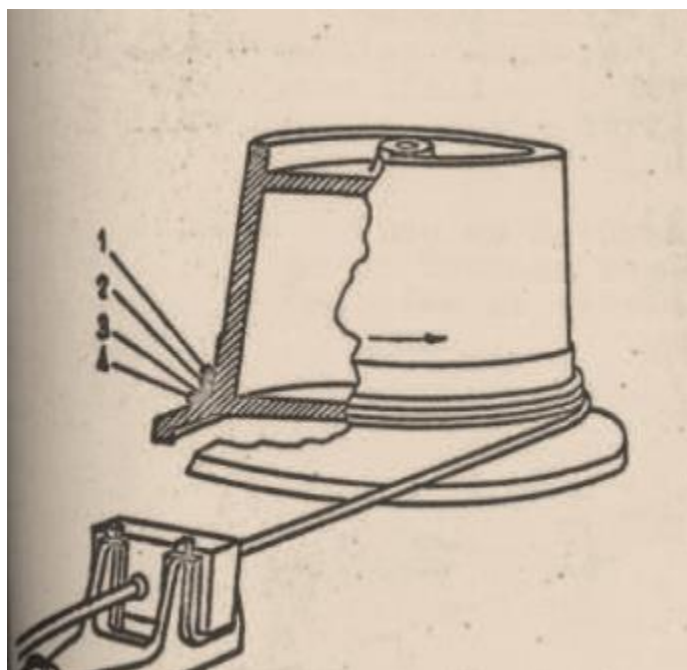


Figura 15. **Bobina de caza utilizada comúnmente en trefilería de aceros duros.**

Bobinas sin caza: Este tipo de bobinas no es utilizado más que para alambres muy gruesos. Su eje de giro es horizontal y su superficie de arrollamiento cilíndrica (Fig. 13). Las espiras estiradas se arrollan una al lado de la otra, pero sin mantenerse ordenadas de manera regular.

El perro suele quedar enganchado al alambre y a la bobina hasta el trefilado total del rollo.

Generalmente en estas bobinas los portahileras se suelen desplazar de manera horizontal, entre dos posiciones límites de forma que para cada vuelta arrollada en la

Estudio de las posibles variables a modificar para reducir las tensiones residuales durante la operación de trefilado y adopción de un sistema de medida para medir las mismas.

bobina le corresponde al portahileras avanzar un espacio igual al diámetro del alambre.

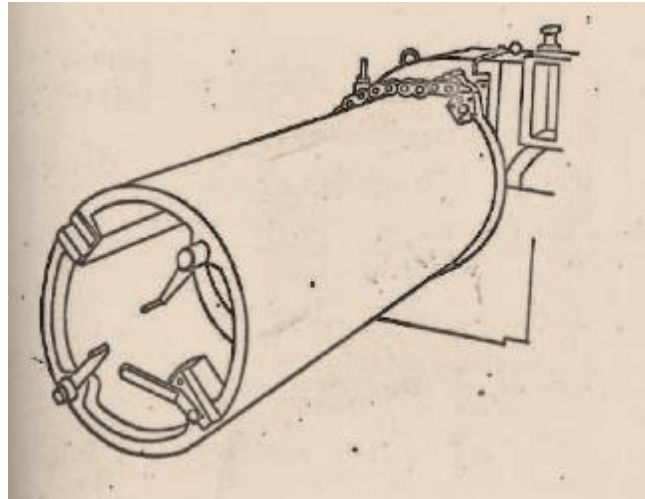


Figura 16. **Bobina sin caza utilizada en trefilería de aceros suaves.**

Carretes: El carrete es un tipo de bobina construida de madera, plástico, cartón o metal sobre la cual se arrolla el alambre después de la última pasada. Es utilizado sobre todo en máquinas para alambres finos y extrafinos.

El alambre se debe arrollar sobre los carretes traccionándolo débilmente y con independencia del trefilado. Todos los carretes suelen arrollar el alambre ayudándose con una corredera, que contribuye a una distribución homogénea de la carga.

Los carretes son muy utilizados en todas aquellas máquina o instalaciones en las que la naturaleza de posterior manufactura del alambre exige disponer de éste encarretado y no en rollo, como sucede por ejemplo con el alambre destinado a fabricar cable.

La refrigeración en las bobinas tiene un papel fundamental, las actuales velocidades de trefilado llevan aparejado un sobrecalentamiento elevado del alambre, y hoy en día no se concibe la idea de una máquina de trefilar sin un sistema de refrigeración de bobinas.

El sistema más empleado es la utilización de una recirculación de agua por el interior de la bobina, refrigeración que en ocasiones se complementa con una ventilación exterior. (2)

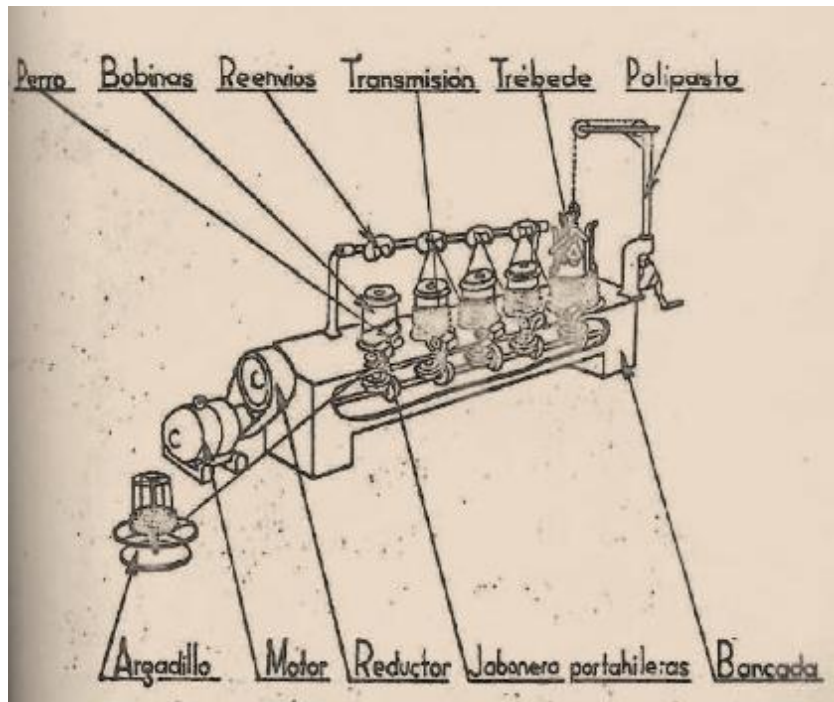


Figura 17. Esquema general de la máquina de trefilar con sus elementos principales.

2.2 PROCESOS PREVIOS AL TREFILADO

Previamente al trefilado final, se realizan una serie de operaciones para preparar el material antes de entrar en la trefiladora para generar el producto final. Estas operaciones no siguen siempre la misma secuencia y, en algunos casos, pueden duplicarse u omitirse algunos de los pasos, pero para la mayoría de los productos siguen la siguiente secuencia, siendo la adoptada como genérica por ser la más utilizada y seguir el orden más lógico.

2.2.1 DECAPADO QUÍMICO

En la operación de decapado el material llega en bruto en rollos y pasa por diferentes cubas, para ser limpiado y descontaminado de las posibles impurezas y de los restos de suciedad. Dependiendo de los requisitos exigidos por el cliente se somete a diferentes procesos, es decir pasa por unas cubas u otras, aunque la mayoría de los clientes demandan prácticamente lo mismo. Existen diferentes cubas:

- Jabones
- Lavados
- Polímeros
- Fosfatos

Estudio de las posibles variables a modificar para reducir las tensiones residuales durante la operación de trefilado y adopción de un sistema de medida para medir las mismas.

- Ácidos
- Desengrase

2.2.2 TREFILADO DE PREPARACIÓN

Previamente a entrar en la línea de patentado el material se prepara en la trefiladora; como cualquier proceso de trefilado, éste se realiza para dotar al material de una mayor resistencia y conseguir el diámetro al cual se quiere patentar.

En algunos casos también se podrá realizar el trefilado de preparación para pasar el material bobinado a un argadillo, facilitando así la entrada en la línea de patentado.

2.2.3 PATENTADO

En esta línea el material es sometido al proceso conocido como patentado; con este proceso el material gana resistencia a tracción y, además, dependiendo de los requisitos exigidos por el cliente, se le da un baño de zinc conocido como galvanizado.

El galvanizado se realiza para evitar la corrosión de los hilos trefilados. El alambre se introduce en las cubas con zinc a temperaturas entre 440-560°C.

El tiempo durante el cual debe estar el material introducido en el zinc para obtener un galvanizado correcto y uniforme, dependerá de la composición del acero, de la temperatura del baño de zinc y del diámetro del material. Después de salir de la cuba se escurre el exceso de zinc.

Este proceso de patentado sigue la siguiente secuencia:

- Caldera
- Baño de plomo
- Cuba de ácido fosfórico
- Baño de zinc

2.3 TENSIONES RESIDUALES

2.3.1 DEFINICIÓN

Las tensiones residuales son aquellas que quedan en el material sólido después de retirar cualquier carga externa que haya podido provocar la aparición de las mismas.

2.3.2 ORIGEN DE LAS TENSIONES RESIDUALES

El origen de las tensiones residuales se encuentra en los procesos de fabricación y conformado de los materiales y en las condiciones de servicio que dan lugar a deformaciones no uniformes. Las deformaciones producidas pueden ser plásticas no uniformes, por lo que el material que las sufre queda sometido a diferentes valores de deformación plástica en distintos puntos de su superficie. Aparte de las deformaciones plásticas puede tratarse también de deformaciones térmicas, las cuales varían de unos puntos a otros del material. Cuando estos dos tipos de deformaciones se relajan aparecen en el material lo que se entiende por tensiones residuales.

Cualquier material que haya sufrido un tratamiento térmico o mecánico es susceptible de generar en su seno un perfil de tensiones residuales que altere las propiedades del mismo.

La importancia de las tensiones residuales dependerá de su cuantía y su distribución. Durante la operación de trefilado las tensiones aparecen de distintas formas:

- En el enfriamiento rápido de un metal, sin cambio de fase, desde la temperatura de tratamiento térmico, la superficie y el interior se contraen a diferentes velocidades, lo cual unido al hecho de que a altas temperaturas el límite elástico es más bajo, puede provocar deformaciones plásticas, ya que el interior no permite contraer todo lo que necesitan las regiones de la superficie. Al llegar a la temperatura ambiente, la superficie se ha extendido en relación con el interior, por lo que el material acabará con un estado de compresión superficial.
- En el temple de los aceros, además de un enfriamiento rápido se produce la transformación de fase austenita a martensita, transformación que lleva consigo un fuerte incremento de volumen por el cambio de estructura cristalina (cúbico a tetragonal) asociado a estas fases. La temperatura de transformación se alcanza antes en la superficie, mientras que el interior permanece en estado austenítico y se deforma plásticamente para acomodarse a este cambio. Posteriormente, se producirá la
- transformación de fase en el interior, produciendo una expansión que será resistida por la martensita de las capas exteriores.
- Las tensiones residuales también se pueden producir en el conformado de los metales, ya que la aparición de deformaciones plásticas homogéneas puede llevar a tensiones diferentes en la superficie y en el interior. Esto es precisamente lo que ocurre en el trefilado. La tensión aplicada para trefilar es suficiente para deformar el material plásticamente. Si la deformación fuera uniforme en toda la sección no habría tensiones residuales. Es la deformación plástica homogénea la principal causante de su aparición.

Estudio de las posibles variables a modificar para reducir las tensiones residuales durante la operación de trefilado y adopción de un sistema de medida para medir las mismas.

La recuperación elástica posterior, tenderá a acortar la superficie con respecto al interior, o al revés, resultando por tanto un estado de tensiones residuales. (3)

2.3.3 MÉTODOS PARA MEDIR TENSIONES RESIDUALES

Las tensiones residuales son importantes fundamentalmente porque no son bien conocidas. La tensión aplicada sobre una estructura o sobre un material es fácil de medir y por tanto de introducirla por ejemplo en un cálculo por elementos finitos. Sin embargo, la tensión residual es una tensión interna del material difícil de medir y que, como consecuencia, no suelen incluirse en el cálculo. Como es bien conocido la tensión de servicio de una estructura o material se compone por la suma de la tensión aplicada y de la tensión residual. Esto significa que, si la tensión residual es desconocida, la tensión de servicio es consecuentemente también desconocida con el consiguiente riesgo. Este desconocimiento de la tensión de servicio es especialmente importante cuando se trata con componentes y estructuras de alto riesgo, responsabilidad o valor económico. Interesa conocer las tensiones residuales fundamentalmente por su influencia en los fenómenos de rotura frágil, corrosión bajo tensión y fatiga. Las tensiones residuales son siempre un perfil, es decir, no puede ocurrir que en todas las secciones de un material existan solamente tensiones residuales de compresión, o únicamente tensiones residuales de tracción. Esto no puede ocurrir debido a que las tensiones residuales son auto-equilibradas para que haya un equilibrio mecánico. Por lo tanto, el hecho de que las tensiones residuales sean un perfil significa que, si en un punto del material se tienen tensiones residuales de compresión, en otro punto del material existirán inevitablemente tensiones residuales de tracción.

Las tensiones residuales poseen la gran desventaja de que no son fácilmente medibles, esto genera un inconveniente a la hora de valorar la existencia o no de las mismas con el fin de poder aportar una solución.

Pese a la dificultad de medición, existen distintos métodos para evaluar las tensiones residuales; las tensiones residuales aparecen en todo tipo de material independientemente de la estructura que presente y por ello no todos los métodos son favorables a la hora de medir las tensiones en el alambre.

Dentro del campo del alambre, ya sea en aceros duros o aceros suaves, existen diferentes formas para medir o comprobar la existencia o no de tensiones residuales.

2.3.3.1 Ensayo de tracción

Al realizar los ensayos de tracción sobre una probeta de alambre se ha constatado que se puede apreciar de manera más o menos significativa la existencia o no de tensiones residuales en el alambre.

Un alambre ideal en el cual no existen tensiones residuales, es decir aquel que ha sido sometido a un tratamiento ya sea térmico, mecánico o químico, para eliminar las tensiones residuales en su estructura, describirá una curva en el ensayo de tracción donde se podrá observar una cierta linealidad hasta que el alambre comienza a plastificar, alcanzando así un límite elástico superior al resto (Fig. 14).

En la muestra de un alambre que contiene tensiones residuales en el interior de su estructura, debido a que no ha sido sometido a ningún tipo de tratamiento previo para eliminarlas, la curva tensión-deformación mostrará una tendencia más curva que en el caso anterior hasta que el alambre comienza a plastificar. La plastificación del alambre, como consecuencia, tendrá lugar antes que en el alambre ideal y por consiguiente el límite elástico será significativamente inferior (Fig. 15).

Este método resulta útil para afirmar la existencia o no de tensiones residuales en la probeta objeto de ensayo, pero como contrapartida no cuantifica el valor de tensiones residuales que posee el material y además tiene carácter destructivo. (4)

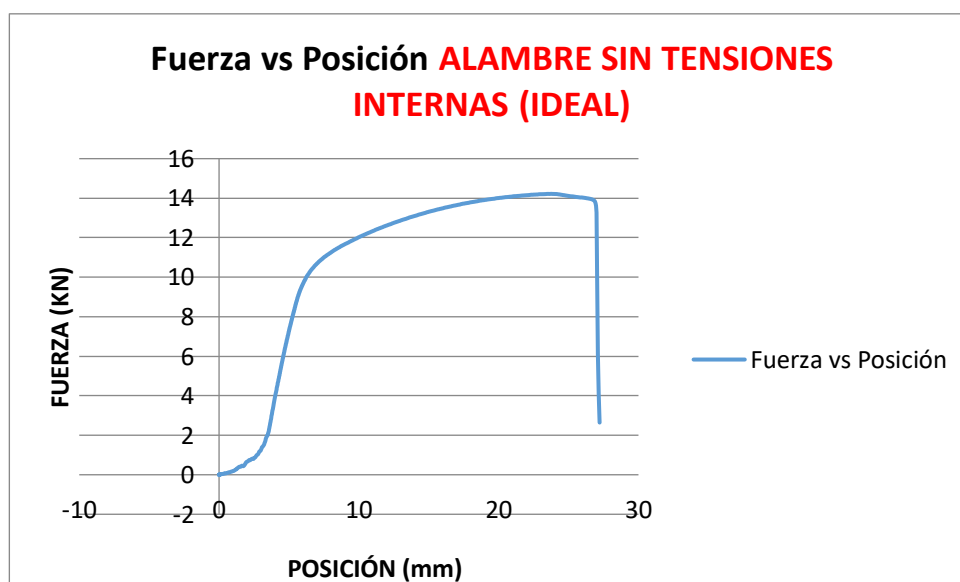


Figura 18. Curva tensión-deformación donde se observa la linealidad de la curva hasta que comienza la plastificación del material.

Estudio de las posibles variables a modificar para reducir las tensiones residuales durante la operación de trefilado y adopción de un sistema de medida para medir las mismas.

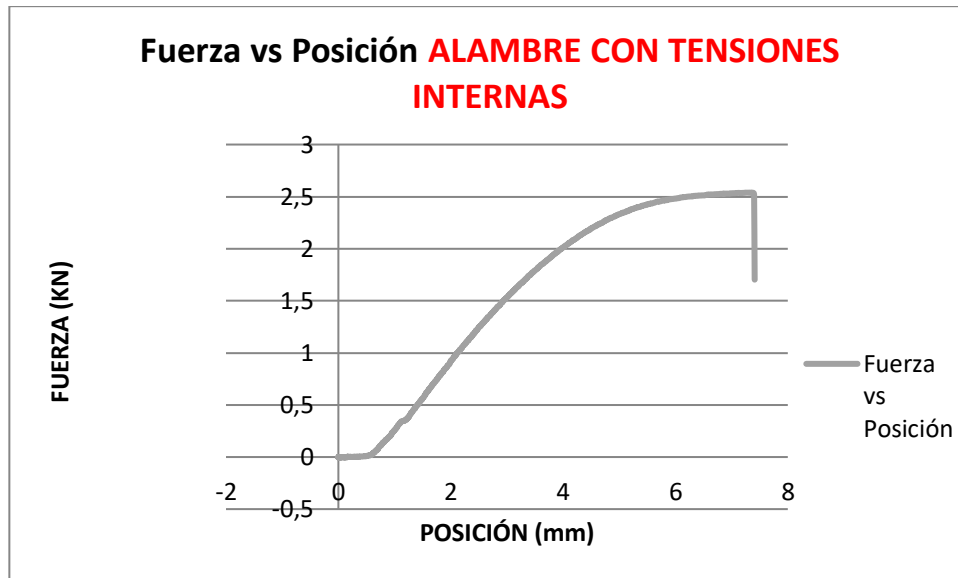


Figura 19. Curva tensión-deformación donde se observa la pérdida de linealidad y ganancia de curvatura en los instantes previos a producirse la plastificación del material.



Figura 20. Máquina de tracción de 10 TN utilizada actualmente en Trefilerías Quijano en el departamento de calidad.

2.3.3.2 Ensayo de relajación

Mediante el ensayo de relajación también se puede apreciar la existencia de las tensiones residuales a la hora de ensayar una probeta.

Los materiales presentarán diferentes comportamientos durante el ensayo de relajación dependiendo de cómo sea la distribución de su perfil de tensiones residuales.

En el alambre al cual llamamos ideal, la distribución durante el ensayo de relajación será uniforme a lo largo de toda la longitud que presente el alambre, esto es debido a que el perfil de tensiones residuales también es uniforme a lo largo de su superficie.

Por el contrario, en los alambres que presenten tensiones internas en su superficie, o lo que es lo mismo que su perfil de tensiones no sea uniforme, el ensayo de relajación no va a ser uniforme ya que será el resultado de la suma de las distintas tensiones que presente en los diferentes puntos.

Al igual que en el ensayo de tracción tan solo se podrá valorar cualitativamente la existencia o no de tensiones residuales, pero tampoco se podrá cuantificar el valor de las mismas. (4)



Figura 21. Máquina de fluencia utilizada comúnmente para realizar ensayos en probetas de acero.

2.3.3.3 Difracción de rayos X

Estudio de las posibles variables a modificar para reducir las tensiones residuales durante la operación de trefilado y adopción de un sistema de medida para medir las mismas.

El método de difracción de rayos X es uno de los métodos más exactos a la hora de medir las tensiones residuales. Este método, a diferencia del resto en los cuales se necesita realizar una interpretación del resultado gráfico, genera un valor numérico a través del cual se puede apreciar la existencia de las tensiones residuales.

Este método consiste en enviar un haz de ondas electromagnéticas (rayos X) con una determinada dirección y sentido, las cuales se desviarán cuando se encuentren con algún impedimento en su camino.

Mediante la técnica de rayos X a través de la difracción de las ondas, se obtiene información sobre el recorrido realizado por el haz de ondas y sobre los materiales encontrados en su camino, incluso la estructura y la distribución de los átomos contra los que el haz ha interactuado.

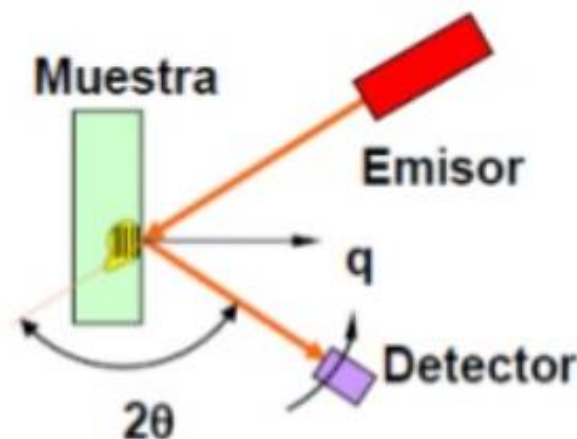


Figura 22. Esquema de cómo se realiza la difracción por rayos X, para poder medir las tensiones residuales.

2.3.4 MÉTODOS PARA REDUCIR LAS TENSIONES RESIDUALES

Durante el proceso de trefilado, el alambre sufre una serie de modificaciones tanto en su estructura superficial como en la distribución y geometría interna de sus granos, y esto hace que se generen tensiones residuales que no aparecían en los procesos previos o que se eliminaban al realizarlos.

A pesar de esto, las tensiones residuales pueden reducirse a valores mínimos si se contemplan una serie de variaciones durante el proceso de trefilado.

2.3.4.1 *Disminución de la velocidad de trefilado.*

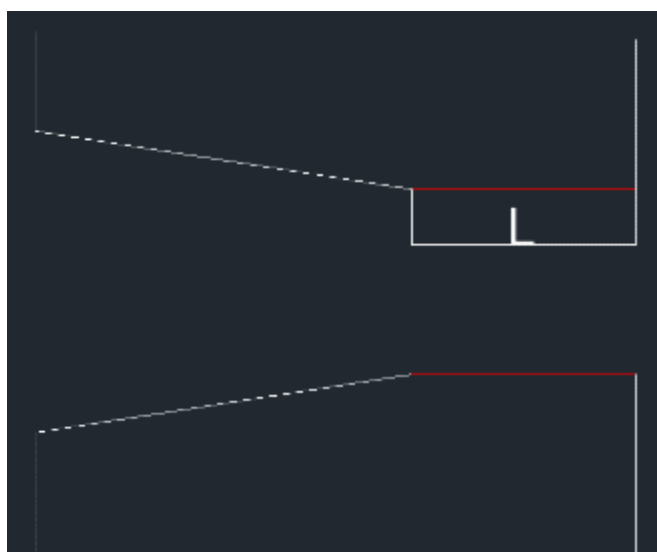
Las altas velocidades en el trefilado pueden generar una mala lubricación en el alambre, debido a que el alambre pasa a gran velocidad por los jaboneros y esta no es capaz de impregnarse lo suficiente de los jabones sólidos, utilizados como lubricantes. A parte de esto una alta velocidad de trefilado genera un sobrecalentamiento en la superficie del alambre que, aunque a que la refrigeración sea la correcta, genera un calentamiento que no puede ser mitigado por la acción del refrigerante. Por ello se crean zonas donde la refrigeración no ha sido la adecuada, lo cual induce a la aparición de tensiones residuales en esas zonas.

Además de la refrigeración, las elevadas velocidades crean una sobretensión de plastificación en el material, lo que conlleva que la plastificación en la superficie del material no se reparta de manera homogénea produciéndose así una alteración del perfil de tensiones residuales.

Velocidades a partir de 10 m/s podrían provocar la aparición de tensiones residuales en la superficie del alambre.

2.3.4.2 *Variación de la longitud de salida.*

En algunos experimentos se ha constatado que, al aumentar la longitud de salida de la hilera, disminuye el perfil de tensiones residuales ya que en esta zona el material puede reorganizar su geometría superficial, siempre que en ella no exista reducción, es decir que se mantenga la última reducción en el diámetro que se ha conseguido en la hilera en cuestión. En la Fig. 16 se puede observar la hilera vista en sección, siendo L la longitud de salida de la misma.



Estudio de las posibles variables a modificar para reducir las tensiones residuales durante la operación de trefilado y adopción de un sistema de medida para medir las mismas.

Figura 23. Hilera vista en sección en la que se indica la longitud de salida (L).

2.3.4.3 Última hilera con reducción mínima.

Otra manera de reducir las tensiones residuales durante el proceso de trefilado es realizando una última pasada por una hilera en la que se realice una reducción mínima, es decir una reducción en el diámetro del alambre del orden del 10-12%. De esta manera se produce una reorganización de los granos situados en la superficie del material. (5)

2.3.4.4 Mantener la temperatura constante durante el proceso.

Durante el proceso de trefilado la situación ideal sería aquella en la cual la temperatura a lo largo de todo el proceso se mantuviese constante. Esto es complicado debido a que las temperaturas varían tanto entre las distintas bobinas como durante los tramos en los que alambre viaja libre, es decir cuando no está sujeto a ningún mecanismo capaz de aportarle calor o frío dependiendo de la necesidad correspondiente en cada momento.

En esta hipotética situación ideal, el perfil de tensiones residuales sería lo más homogéneo posible, pudiendo incluso disminuir en algunos casos

2.3.4.5 Variación en el ángulo de entrada de la hilera.

El ángulo de entrada de la hilera tiene una gran influencia no solo en el trefilado, sino que también tiene importancia en el perfil de tensiones residuales. Según los estudios realizados, al aumentar el ángulo de entrada de la hilera aumentarán también las tensiones residuales durante el proceso de trefilado.

Las tensiones residuales se generan al aumentar las fuerzas de compresión que ejerce la hilera sobre el material.

Un ángulo de entrada en la hilera entre 3° – 5° sería lo ideal para garantizar una reducción notable en las tensiones residuales. (5)

2.3.4.6 Tratamiento térmico o recocido.

Aparte de las variaciones mecánicas que se han citado anteriormente, también existe la posibilidad de disminuir las tensiones residuales internas realizando un tratamiento térmico posterior al trefilado conocido como recocido de estabilización.

El recocido es un tratamiento térmico utilizado en las plantas de trefilado, para que el alambre recupere algunas propiedades físicas que se pierden al someterle a estire durante el trefilado en frío.

Consiste en calentar el acero hasta una temperatura determinada durante un tiempo previsto, y posteriormente enfriarlo lentamente.

El proceso de recocido consta de tres etapas fundamentales:

- Calentamiento hasta una temperatura prefijada (entre 500 – 700°C)
- Mantenimiento de la temperatura durante el tiempo conveniente.
- Enfriamiento hasta alcanzar la temperatura ambiente, generalmente a bajas velocidades.

Este tratamiento es el más eficaz a la hora de eliminar tensiones internas de los anteriormente vistos, pero como contrapartida genera una disminución en la resistencia a tracción y la dureza del alambre.

2.3.4.7 *Vibrado del material.*

El método por vibración introduce energía mecánica dentro de la pieza a estabilizar. Para la red de átomos con tensiones, no existe diferencia entre la energía térmica y la introducida por vibración. Esta energía vuelve a alinear la estructura interna del material aliviando los esfuerzos y estabilizando la pieza sin sufrir deformaciones.

El tratamiento por vibración se puede usar para estabilizar piezas que presentan tensiones debido a procesos de mecanizado, fresado, rectificado, troquelado, escariado, estampado, perforado, cepillado, forjado y soldado.

El método se basa en la introducción de vibraciones de baja frecuencia y alta amplitud durante un breve período de tiempo basado en el peso de la pieza a estabilizar. Se ha comprobado que las vibraciones resonantes son el método más efectivo para reducir los esfuerzos residuales por medio de vibraciones.

El proceso mediante frecuencias resonantes produce una redistribución de esfuerzos más pronunciada en comparación con los métodos con frecuencias subresonantes o subarmónicas. Las vibraciones de baja frecuencia proporcionan energía de gran amplitud y son muy eficientes en la reducción de los picos de esfuerzos residuales en las piezas metálicas y estructuras de componentes soldados. (6)

2.3.4.8 *Patentado.*

Estudio de las posibles variables a modificar para reducir las tensiones residuales durante la operación de trefilado y adopción de un sistema de medida para medir las mismas.

El tratamiento de patentado explicado en el punto 2.2.3. elimina las posibles tensiones residuales que hubiesen podido aparecer en el material antes de llegar a este proceso.

Es un tratamiento que se podría definir como térmico ya que consiste en un recalentamiento del material hasta temperaturas de entre 440-560°. Sin embargo, no llega a las temperaturas requeridas en el proceso de recocido.

3 METODOLOGÍA

3.1 REVISIÓN DE LOS MÉTODOS DE MEDICIÓN DE TENSIONES RESIDUALES

De todos los métodos eficaces para medir tensiones residuales descritos anteriormente, no todos ellos se adecuan a la manera de trabajar en Trefilerías Quijano. Por ello se hará una valoración de estos teniendo en cuenta aspectos como: disponibilidad, coste económico, funcionalidad y fiabilidad en los resultados de medición.

Para ello se deberá tener en cuenta que en este caso en concreto no será necesario cuantificar el valor de tensiones residuales a un valor numérico, sino que será suficiente con conocer la existencia de las mismas y ver si se mantienen o desaparecen al realizar las variaciones oportunas en el proceso de fabricación (valoración cualitativa).

3.1.1 ENSAYO DE TRACCIÓN

En este método de medición se puede observar de manera más o menos intuitiva la existencia de tensiones residuales, se ve claramente al comparar dos gráficas en las que se sabe de antemano que una tiene tensiones residuales y la otra no.

La curva de deformación del material que no presenta tensiones residuales tiene una tendencia lineal al comienzo de la gráfica hasta que el material comienza a plastificar.

En la empresa actualmente se dispone de tres máquinas de tracción para ensayar probetas de diferentes diámetros, por lo que la disponibilidad de estas está más que garantizada y no habría que realizar ningún desembolso económico para realizar este tipo ensayo.

Además de todo esto hay que destacar que los operarios los cuales realizan este tipo de ensayos en el departamento de calidad están muy familiarizados con este procedimiento experimental

3.1.2 ENSAYO DE RELAJACIÓN

El ensayo de relajación permite observar en el resultado gráfico que genera, la existencia o ausencia de las tensiones residuales, lo que sería suficiente para este caso.

Como contrapartida presenta el inconveniente de que la empresa no dispone de máquina para realizar ensayos de fluencia o relajación lo que supone que se debería de realizar un gasto económico importante debido al coste de dichas máquinas.

Estudio de las posibles variables a modificar para reducir las tensiones residuales durante la operación de trefilado y adopción de un sistema de medida para medir las mismas.

Por otro lado, los operarios no están familiarizados con este tipo de ensayo por lo que sería necesario un período de formación para poder operar con éxito. Otra opción que se podría valorar es la subcontratación externa de estos ensayos si fuese conveniente.

3.1.3 DIFRACCIÓN DE RAYOS X

El método de difracción por rayos X es el más exacto de los anteriormente descritos, debido a que no es necesario realizar una interpretación de la gráfica que el ensayo nos proporciona, sino que a través de este ensayo se obtiene un determinado valor numérico a partir del cual se puede saber con claridad si existen o no tensiones residuales, obteniendo incluso de esta forma un orden de magnitud de las mismas.

Sin embargo, este método de medición no se realiza de manera rápida, ya que realizarlo requiere un mayor tiempo que lo que se tarda en realizar los ensayos anteriores. En el campo empresarial un coste temporal lleva adosado un coste económico.

Además de esto en la empresa no se dispone de los medios necesarios para poder realizar este tipo de ensayos, es por esto que sería necesario contratar a otra empresa externa la acometida de dicho trabajo, lo cual se traduciría en un aumento del costo del producto.

3.1.4 CONCLUSIÓN DE LA REVISIÓN DE LOS MÉTODOS DE MEDICIÓN

Tras realizar una valoración de las tres opciones existentes, analizando los pros y contras de cada una en cuanto a los aspectos más representativos referidos a los intereses de la empresa, se realizó una reunión con el responsable de producción del departamento de acero duro, en el cual se acordó que el método de medida utilizado sería el ensayo de tracción.

Se ha elegido este método por ser el que reunía un mayor número de ventajas tanto en el marco económico como en el marco productivo.

Además, se acordó que si en algún caso aislado este método no era lo suficientemente informativo se llevaría a cabo el método de difracción de rayos X como segunda opción por ser el más exacto.

3.2 REVISIÓN DE LOS MÉTODOS PARA REDUCIR LAS TENSIONES RESIDUALES

Al igual que en los métodos de medición de las tensiones residuales, también se plantea la necesidad de realizar una valoración de las posibles modificaciones dentro del proceso productivo, para evitar la aparición de las tensiones residuales o disminuirlas en tal caso.

3.2.1 DISMINUCIÓN DE LA VELOCIDAD DE TREFILADO

La velocidad de trefilado varía dependiendo del diámetro del alambre e incluso de la calidad del material que se trefila.

A menor velocidad de trefilado menor sobrecalentamiento, lubricación más efectiva y por consiguiente menor probabilidad de que se generen tensiones residuales en la superficie de este.

Tras realizar una valoración de las velocidades de trefilado a las que generalmente trabajan las máquinas en la empresa se ha comprobado que estas en ningún momento superan los 10 m/s, valor teórico a partir de cual se generan las tensiones residuales.

Es por esto por lo que, la velocidad no es un parámetro que a priori influya en nuestro proceso productivo en lo que se refiere a las tensiones residuales.

3.2.2 VARIACIÓN DE LA LONGITUD DE SALIDA

Para variar la longitud de salida de las hileras se deberá alterar la geometría de las mismas, esto no sería posible realizarlo únicamente puliendo la hilera, sino que debería variar su estructura de fabricación lo cual supondría un coste agregado a la hora de cambiar todos los juegos de hileras existentes.

3.2.3 ÚLTIMA HILERA CON REDUCCIÓN MÍNIMA

El paso de una última hilera con reducción mínima es otra de las opciones que se plantean, la propia empresa ya realiza esta variante en el material destinado a un determinado cliente. Pudiendo así comprobar que esta opción genera un resultado satisfactorio en la mayoría de los casos.

Esta opción resulta positiva, pero plantea como inconveniente la necesidad de aumentar la reducción en el resto de las hileras para lograr en la última hilera el diámetro deseado; este aumento de reducciones en el resto de las hileras en algunas ocasiones puede generar la aparición de las tensiones residuales.

Estudio de las posibles variables a modificar para reducir las tensiones residuales durante la operación de trefilado y adopción de un sistema de medida para medir las mismas.

3.2.4 MANTENIMIENTO DE LA TEMPERATURA CONSTANTE DURANTE EL PROCESO

Una temperatura constante durante todo el proceso del trefilado evitaría una desorganización de las moléculas del alambre. De esta manera se evitaría que se generasen tensiones residuales por este motivo, ya que los cambios de temperatura es uno de los motivos de la aparición de las tensiones residuales.

Por otro lado, mantener la temperatura constante durante todo el proceso de trefilado sería a priori asequible durante el tiempo que el alambre está en contacto con la bobina, pero el resto del tiempo durante el cual el alambre viaja libre sería bastante complejo debido a que sería necesario calefactar todo el proceso, lo que conlleva el aislamiento de parte de la máquina.

Esta variación supondría un coste económico importante para poder valorar la eficacia de esta, lo que hace que esté prácticamente descartada como opción primaria.

3.2.5 VARIACIÓN EN EL ÁNGULO DE ENTRADA DE LA HILERA

Actualmente la empresa trabaja con ángulo de entrada en la hilera de 9° o 12° dependiendo de la calidad del material a trefilar. Estos ángulos están muy lejos de los valores teóricos expuestos en el apartado 2.3.4.5.; aunque no sería necesario llegar a valores tan bajos sería necesario reducir estos valores actuales.

Esta variación supondría variar la geometría de las hileras actuales y realizar las pruebas pertinentes para comprobar su eficacia.

El ángulo de entrada en la hilera también hace que varíen algunos parámetros medibles en el producto final, es por ello que además de controlar las tensiones residuales sería necesario controlar la variabilidad de estos parámetros.

Como punto positivo cabe resaltar que este cambio de geometría sería posible realizarlo dentro de la propia empresa, ya que esta posee un departamento para el pulido de las hileras y donde se realizan hileras con los ángulos utilizados normalmente. De esta manera sería posible a partir de hileras con ángulos de entrada de 9° o 12° reducirlos a ángulos menores. Esta posibilidad hace que este tipo de variación tenga un coste asequible y prácticamente mínimo, por lo que resulta una opción interesante.

3.2.6 TRATAMIENTO TÉRMICO O RECOCIDO

Con este tratamiento se eliminarían completamente todas las tensiones generadas durante el proceso de trefilado. Este método es uno de los más fiables a la hora de eliminar las tensiones residuales en el material.

Como aspecto negativo hay que destacar que la resistencia a tracción que se ha ganado en el material a través del proceso de trefilado disminuiría de forma drástica al aplicar este proceso y este aspecto no interesa debido a que uno de los objetivos del trefilado es dotar al material de una mayor resistencia a tracción. No obstante, existiría la posibilidad de que se realizase a temperaturas más bajas para que el descenso de resistencia fuese mínimo.

Otro de los inconvenientes que plantea este método es el coste económico que genera tener que someter a este proceso al material, lo cual encarecería el producto final.

3.2.7 VIBRADO DEL MATERIAL

La técnica del vibrado podría ser una solución al problema que se plantea, este método debería ser al igual que el anterior tras el proceso de trefilado.

El gran inconveniente que plantea este método es la estructura del material tras el trefilado y el desembolso económico que debería realizarse para la compra o creación de una máquina capaz de generar esas vibraciones.

3.2.8 PATENTADO

El proceso de patentado, como se ha explicado en el apartado 2.2.3., se utiliza para aumentar la resistencia a tracción en el alambre. Generalmente este proceso se realiza antes de que el material sea trefilado, pero podría realizarse también a posteriori.

Durante el proceso de patentado las tensiones residuales se eliminan prácticamente por completo quedando así el material libre de ellas antes de su entrada en máquina.

Una de las opciones sería repetir este proceso de patentado tras el trefilado y comprobar que las tensiones generadas se eliminan de nuevo.

Esta opción resulta interesante en el marco productivo, pero genera un aumento en el coste económico del material.

Estudio de las posibles variables a modificar para reducir las tensiones residuales durante la operación de trefilado y adopción de un sistema de medida para medir las mismas.

3.2.9 CONCLUSIONES DE LA REVISIÓN DE LOS MÉTODOS PARA REDUCIR LAS TENSIONES RESIDUALES

Después de realizar una valoración de todas las variaciones posibles a implantar dentro del proceso productivo y realizar una reunión para exponer todas ellas de una forma más específica, se llevó a cabo la elección del método a implantar teniendo en cuenta los siguientes aspectos como requisitos básicos para la elección.

- El coste económico debe ser mínimo, debido a que el proyecto en cuestión está en una fase de elaboración en la que aún no se conoce la posibilidad de alcance.
- La opción escogida deberá estar desarrollada lo antes posible debido al tiempo del que se dispone. El becario el cuál realizará los ensayos necesarios carece de un tiempo indefinido dentro de la empresa, limitado al marco temporal que le impone su periodo de prácticas en la misma.
- Se valorará aquel método que no precise de ayuda exterior para su comprobación y puesta en marcha, es decir que la propia empresa pueda realizar dicha variación sin ayuda de ninguna empresa externa. Lo cual también se traduce en un ahorro económico.
- Un incremento en el tiempo del proceso del producto supondrá inevitablemente un aumento del coste económico.

Tras analizar estos puntos frente a los métodos de variación indicados anteriormente se ha decidido, por ser la opción que mejor se adapta al proceso productivo y que cumple un mayor número de puntos, que el método de variación elegido para comprobar su eficacia frente a la disminución de las tensiones residuales sea la: VARIACIÓN EN EL ÁNGULO DE ENTRADA DE LA HILERA.

3.3 VALORACIÓN DEL MÉTODO DE CONTROL ELEGIDO (ENSAYO A TRACCIÓN)

Una vez determinado cuál va a ser el sistema de medición a partir del cual se va a analizar la existencia o no de las tensiones residuales, el siguiente paso es comprobar la eficacia y la utilidad de este en el material a valorar.

Para poder comprobar el alcance de medición de este método se realizarán diferentes ensayos, en materiales de diferentes calidades según su porcentaje de contenido en carbono y de diferentes diámetros. Este sistema de medida debe ser probado en el amplio rango de materiales con los que trabaja la empresa.

El estudio se ha planteado de la siguiente manera: por un lado, se ensayarán aquellos materiales de los cuales se sabe a ciencia cierta que no contienen tensiones residuales, en este caso serán los rollos de alambrón que han salido de la caldera o línea de patentado.

Por otro lado, se ensayarán materiales que entran a la línea de galvanizado pero que no han sido patentados, es decir, aquellos que tendrán un perfil de tensiones característico propio de la línea de decapado químico.

Por último, se probarán los aceros ya trefilados, es decir, aquellos que se sabe que contienen tensiones residuales en su estructura.

El trabajo se ha planteado de esta manera para poder comparar ambas gráficas, por un lado, la que se sabe que contiene tensiones y residuales y por otro la que no las contiene.

A partir de esta serie de ensayos, se podrá verificar la diferencia entre ambas curvas de tensión – deformación.

En el caso de resultar válido este método de medición, los empleados del departamento de calidad se deberán ir familiarizando con las principales diferencias entre estas dos gráficas para poder detectar las tensiones en materiales en los cuales a priori no se tendrán ambas curvas para poder comparar.

3.3.1 ENSAYOS DE MATERIAL DE CALDERA O LÍNEA DE PATENTADO (SIN TENSIONES RESIDUALES)

La manera de operar será realizar los ensayos en la máquina de tracción para los siguientes materiales de las probetas cortadas previamente.

Los ensayos se realizarán con una medida fijada previamente para el cual están determinados los parámetros de la máquina. Esta medida será de aproximadamente unos 300 mm de longitud.

En el caso de que la muestra este galvanizada se limpiarán los extremos de esta, es decir en las partes en las que la muestra va a tener contacto directo con las mordazas.

La limpieza se realizará con ayuda de ácido clorhídrico (HCl), esta operación tendrá lugar en una campana de gases debidamente ventilada para evitar el contacto directo con los gases que se generan. La muestra se deja un par de minutos sumergida en cada extremo en un vaso de precipitados con la disolución de HCl, seguidamente se eliminan los residuos generados con abundante agua y un papel absorbente dejando la muestra lista para ser ensayada. Este proceso se repite para ambos extremos.

Estudio de las posibles variables a modificar para reducir las tensiones residuales durante la operación de trefilado y adopción de un sistema de medida para medir las mismas.



Figura 24. Campana de gases utilizada para limpiar las muestras con los ácidos y evitar el contacto directo con los gases generados.

Una vez que la muestra está perfectamente limpia, lo que comúnmente se llama en “gris”, se mide su diámetro con la ayuda de un micrómetro.



Figura 25. Micrómetro digital utilizado comúnmente en la empresa para medir el diámetro del alambre.

Cuando la muestra ha sido limpiada y medida ya puede ser ensayada en la máquina de tracción.

Todo este proceso anteriormente descrito será necesario para cualquier muestra que se quiera ensayar a tracción.

Las muestras de la caldera que han sido ensayadas para su posterior análisis son las siguientes:

MUESTRA	CALIDAD	Ø (mm)	LONGITUD (mm)	%C	%Mn
3.3.1.1.	K68G	6,51	300	0,655	0,620
3.3.1.2.	K83G-K	4,6	300	0,834	0,610
3.3.1.3.	K70G	5,5	300	0,685	0,620
3.3.1.4.	K73G	5,5	300	0,715	0,635
3.3.1.5.	K73G	5,5	300	0,720	0,635
3.3.1.6.	K73G	5,5	300	0,711	0,495
3.3.1.7.	K83G-K	5,5	300	0,826	0,646
3.3.1.8.	K83G-K	5,5	300	0,832	0,640
3.3.1.9.	K68G	6,5	300	0,650	0,625

3.3.2 ENSAYOS DE MATERIAL DE CALDERA SIN PATENTAR (CON TENSIONES RESIDUALES)

Estas muestras han pasado por la línea de la caldera, pero no han sido sometidas al proceso de patentado, tan solo han pasado por las cubas de ácido para limpiar su superficie. Es por esto por lo que, al no estar patentadas, tienen una menor resistencia a la salida de la línea de la caldera. Todo este material que no está patentado se le identifica con la terminación “2” en la dimensión de su diámetro; no quiere decir que sea exactamente ese diámetro, tan solo se le añade ese código alfanumérico para identificarlas como material que ha pasado por la caldera y no ha sido patentado.

Al no estar patentado este material, no se habrán eliminado las posibles tensiones residuales que se hubiesen creado durante el proceso de fabricación.

El proceso de preparación de estas muestras es idéntico que las del apartado anterior 3.3.1., por lo que la medida de su resistencia a tracción y, por consiguiente, la medida de la existencia de tensiones residuales también se realizará de igual manera.

Estudio de las posibles variables a modificar para reducir las tensiones residuales durante la operación de trefilado y adopción de un sistema de medida para medir las mismas.

MUESTRA	CALIDAD	Ø (mm)	LONGITUD (mm)	%C	%Mn
3.3.2.1.	K83G-K	6,52	300	0,821	0,623
3.3.2.2.	K83G-K	6,52	300	0,840	0,620

3.3.3 ENSAYOS DE MATERIAL TREFILADO (CON TENSIONES RESIDUALES)

Estas probetas serán las resultantes del proceso de trefilado, es decir, del último paso en la línea de producción del material. En el caso del material patentado que llega sin tensiones residuales, estas se generan de nuevo al trefilar y en el caso del material que no ha sido patentado, o aumentan sus tensiones o varía significativamente su perfil de tensiones residuales.

Es por esto que las probetas ensayadas de este material de producto final contienen en ambos casos tensiones residuales.

Estas probetas serán comparadas después de realizar sus ensayos con las de material patentado para comprobar las diferencias entre ambas curvas.

Al igual que en los dos casos anteriores, el proceso de preparación y medición de estas muestras será idéntico al planteado en los casos 3.3.1. y 3.3.2.

MUESTRA	CALIDAD	Ø (mm)	LONGITUD (mm)	%C	%Mn
3.3.3.1.	K68G	4,90	300	0,650	0,625
3.3.3.2.	K73G	2,84	300	0,720	0,504
3.3.3.3.	K75G	5,00	300	0,750	0,425
3.3.3.4.	K83G-K	3,04	300	0,650	0,625

3.4 VALORACIÓN DE LA VARIACIÓN ELEGIDA EN EL PROCESO DE PRODUCCIÓN ELEGIDO PARA REDUCIR LAS TENSIONES RESIDUALES (VARIACIÓN EN EL ÁNGULO DE ENTRADA DE LA HILERA)

Después de realizar una valoración de todas las posibles variaciones contempladas dentro del proceso productivo del material, se debe comprobar la eficacia de la alternativa que ha sido elegida, en este caso variación en el ángulo de entrada de la hilera.

Al igual que en el caso anterior se comprueba su alcance mediante la realización de varios ensayos de tracción de una serie de muestras seleccionadas.

Para validar la alternativa se ha decidido analizar el material durante todo el proceso que se lleva a cabo en la empresa. Es decir, desde que el material sale de la línea de decape hasta que sale de la trefiladora como producto acabado. Se van a analizar tres procesos completos de tres coladas diferentes y distintos diámetros.

Además de estos tres procesos se va a realizar una prueba adicional en una de las trefiladoras en las que se cerrará por completo la llave de paso del agua, es decir la refrigeración será nula esperando obtener un aumento de las tensiones residuales.

Tras el proceso de decapado y de caldera solo se analizará una prueba. Sin embargo, para el producto final se analizarán dos pruebas una en las que las hileras tendrán ángulos de entrada de 9-12° y otro en el que los ángulos de entrada serán 3-4°, siempre siendo el mismo rollo de la misma colada. Se trefilará aproximadamente medio rollo con unos ángulos y el resto con los otros.

Debido a que el cambiar las hileras es una tarea laboriosa y la cual requiere bastante tiempo tan solo se han podido analizar tres procesos ya que un aumento en el número de ensayos produciría un coste muy elevado teniendo en cuenta que aún no se conoce la eficacia de ello.

3.4.1 ENSAYO DE LOS DISTINTOS PROCESOS

La realización de los ensayos se realizará de igual manera que en el punto 3.3. ya que la manera de proceder es común en ambos casos.

Los procesos seleccionados para valorar la eficacia de esta alternativa son los siguientes:

Estudio de las posibles variables a modificar para reducir las tensiones residuales durante la operación de trefilado y adopción de un sistema de medida para medir las mismas.

PROCESO	OPERACIÓN	Ø ENTRADA (mm)	Ø SALIDADA (mm)	CALIDAD	ÁNGULO HILERA
A	DECAPE	5,5	5,5	K83G-K	
	CALDERA	3,65	3,65		
	TREFILADO 0	3,65	1,2		9/12
	TREFILADO 1	3,65	1,2		3/4

PROCESO	OPERACIÓN	Ø ENTRADA (mm)	Ø SALIDADA (mm)	CALIDAD	ÁNGULO HILERA
B	DECAPE	6,5	6,5	K83G-K	
	CALDERA	6,5	6,5		
	TREFILADO 0	6,5	2,35		9/12
	TREFILADO 1	6,5	2,35		3/4

PROCESO	OPERACIÓN	Ø ENTRADA (mm)	Ø SALIDADA (mm)	CALIDAD	ÁNGULO HILERA
C	CALDERA	6,52	6,52	K83G-K	
	TREFILADO 0	6,52	2,25		9/12
	TREFILADO 1	6,52	2,25		3/4

4 RESULTADOS

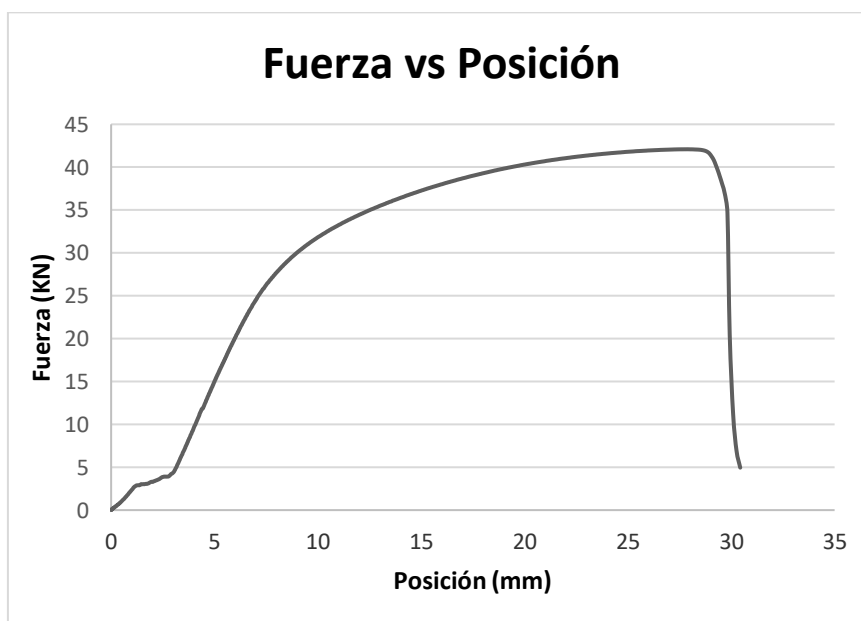
4.1 RESULTADOS DEL MÉTODO DE MEDICIÓN DE LAS TENSIONES RESIDUALES.

En este apartado se analizarán los resultados obtenidos en los ensayos realizados anteriormente. Por un lado, se tendrán en cuenta los valores característicos de un ensayo de tracción y por otro se tendrán en cuenta las distintas gráficas, que es realmente lo que se pretende analizar.

4.1.1 ENSAYOS PROBETAS DE LA CALDERA PATENTADO.

4.1.1.1 MUESTRA CALDERA/PATENTADO 1

Referencia: 3.3.1.1.



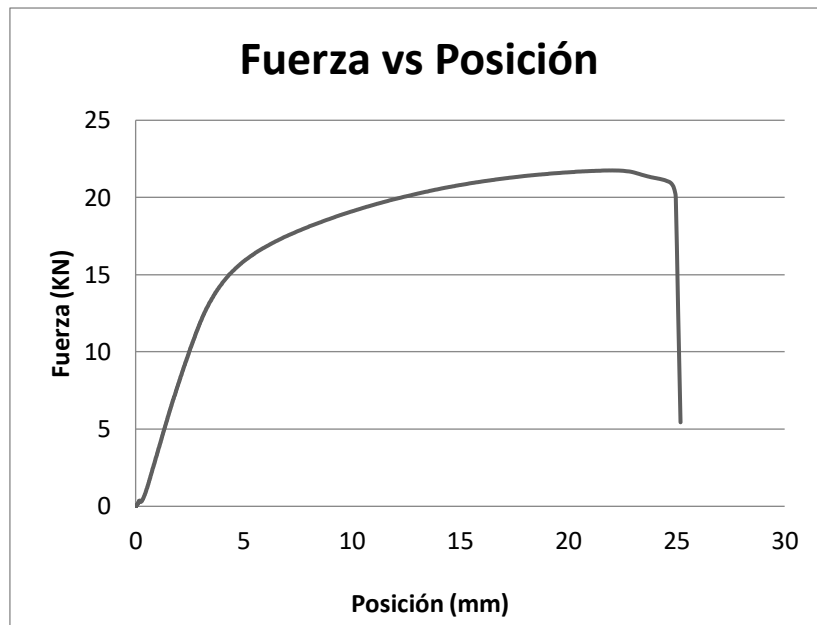
Gráfica 1. Curva tensión-deformación de la muestra de patentado 1

Carga Máxima (KN)
42,09

4.1.1.2 MUESTRA CALDERA/PATENTADO 2

Estudio de las posibles variables a modificar para reducir las tensiones residuales durante la operación de trefilado y adopción de un sistema de medida para medir las mismas.

Referencia: 3.3.1.2.

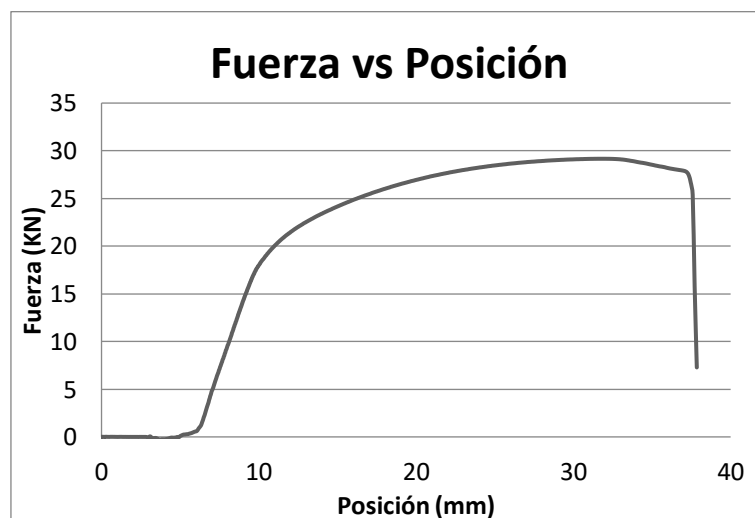


Gráfica 2. Curva tensión-deformación de la muestra de patentado 2

Carga Máxima (kN)
21,75

4.1.1.3 MUESTRA CALDERA/PATENTADO 3

Referencia 3.3.1.3.



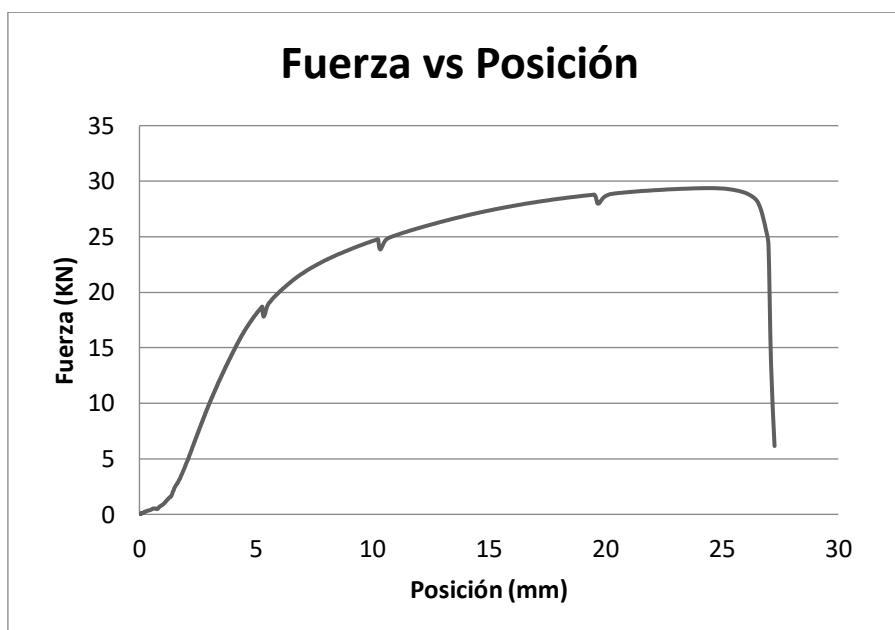
Gráfica 3. Curva tensión-deformación de la muestra de patentado 3

Carga Máxima (KN)

29,16

4.1.1.4 MUESTRA CALDERA/PATENTADO 4

Referencia: 3.3.1.4.



Gráfica 4. Curva tensión-deformación de la muestra de patentado 4

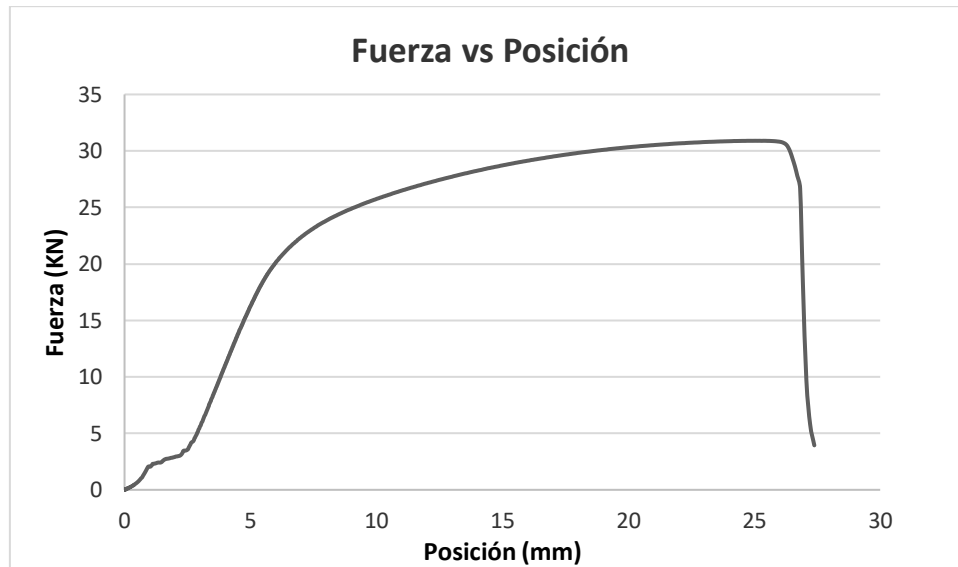
Carga Máxima (KN)

29,37

4.1.1.5 MUESTRA CALDERA/PATENTADO 5

Referencia 3.3.1.5.

Estudio de las posibles variables a modificar para reducir las tensiones residuales durante la operación de trefilado y adopción de un sistema de medida para medir las mismas.

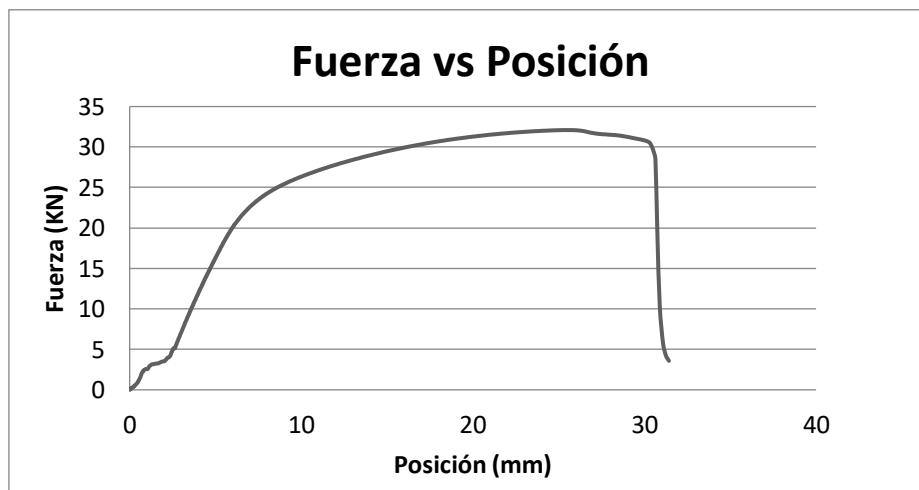


Gráfica 5. Curva tensión-deformación de la muestra de patentado 5

Carga Máxima (KN)
30,90

4.1.1.6 MUESTRA CALDERA/PATENTADO 6

Referencia: 3.3.1.6.

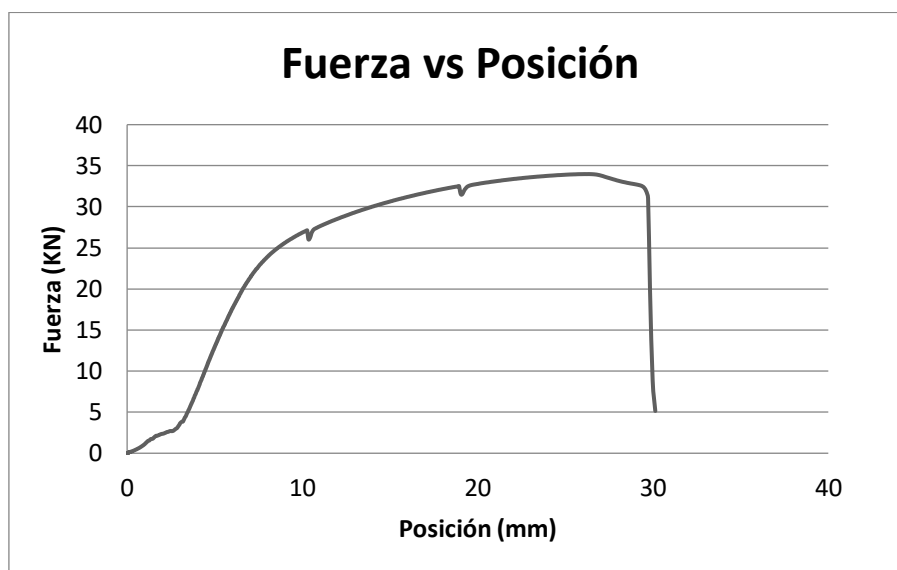


Gráfica 6. Curva tensión-deformación de la muestra de patentado 6

Carga Máxima (KN)
32,09

4.1.1.7 MUESTRA CALDERA/PATENTADO 7

Referencia: 3.3.1.7.

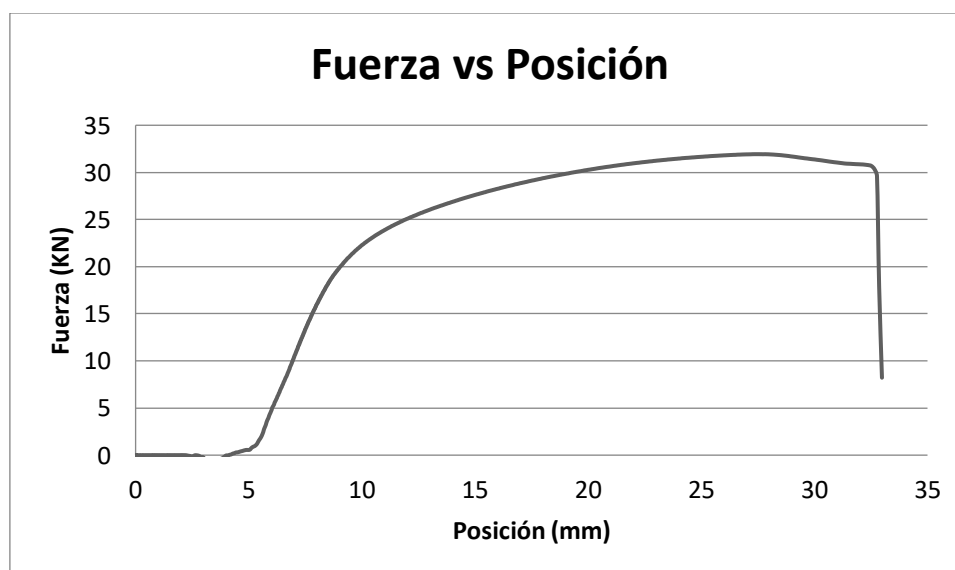


Gráfica 7. Curva tensión-deformación de la muestra de patentado 7

Carga Máxima (kN)
33,98

4.1.1.8 MUESTRA CALDERA/PATENTADO 8

Referencia: 3.3.1.8.



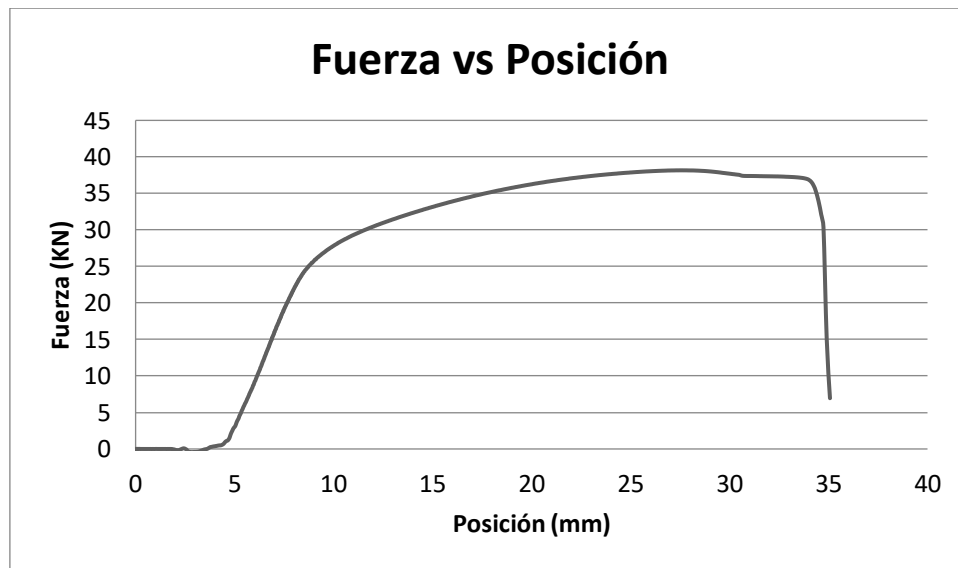
Gráfica 8. Curva tensión-deformación de la muestra de patentado 8

Estudio de las posibles variables a modificar para reducir las tensiones residuales durante la operación de trefilado y adopción de un sistema de medida para medir las mismas.

Carga Máxima (KN)
31,93

4.1.1.9 MUESTRA CALDERA/PATENTADO 9

Referencia: 3.3.1.9.



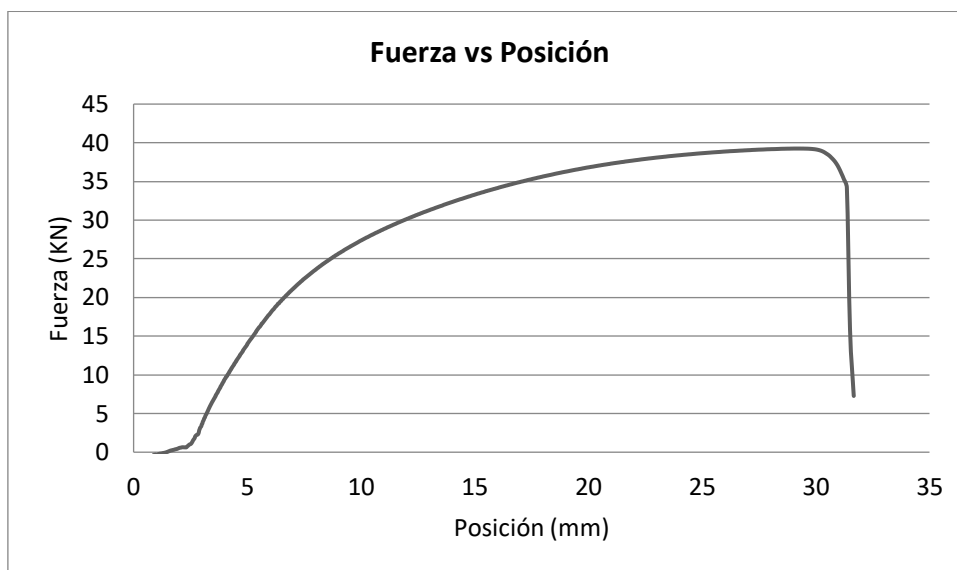
Gráfica 9. Curva tensión-deformación de la muestra de patentado 9

Carga Máxima (KN)
38,16

4.1.2 ENSAYOS PROBETAS GALVANIZADAS SIN PATENTAR.

4.1.2.1 MUESTRA CALDERA SIN PATENTAR 1

Referencia: 3.3.2.1.

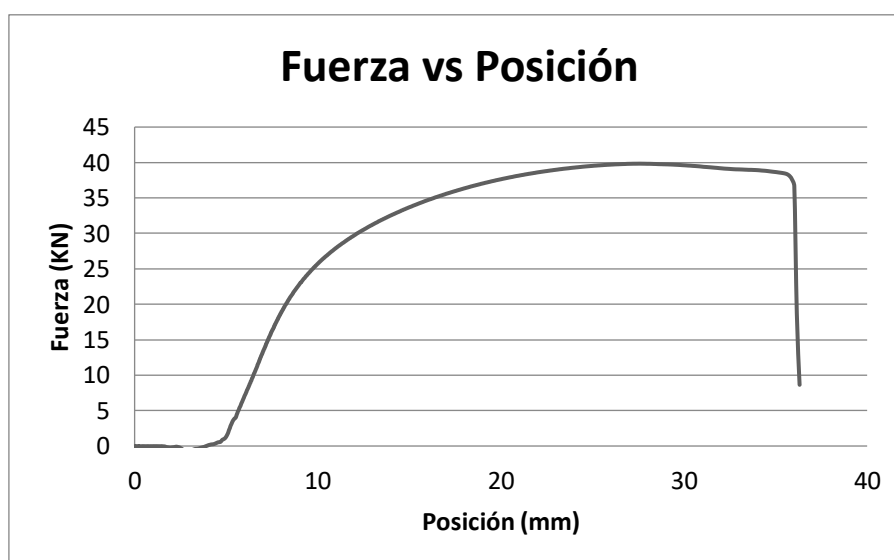


Gráfica 10. Curva tensión-deformación de la muestra sin patentar 1

Carga Máxima (KN)
39,25

4.1.2.2 MUESTRA CALDERA SIN PATENTAR 2

Referencia: 3.3.2.2.



Gráfica 11. Curva tensión-deformación de la muestra sin patentar 2

Estudio de las posibles variables a modificar para reducir las tensiones residuales durante la operación de trefilado y adopción de un sistema de medida para medir las mismas.

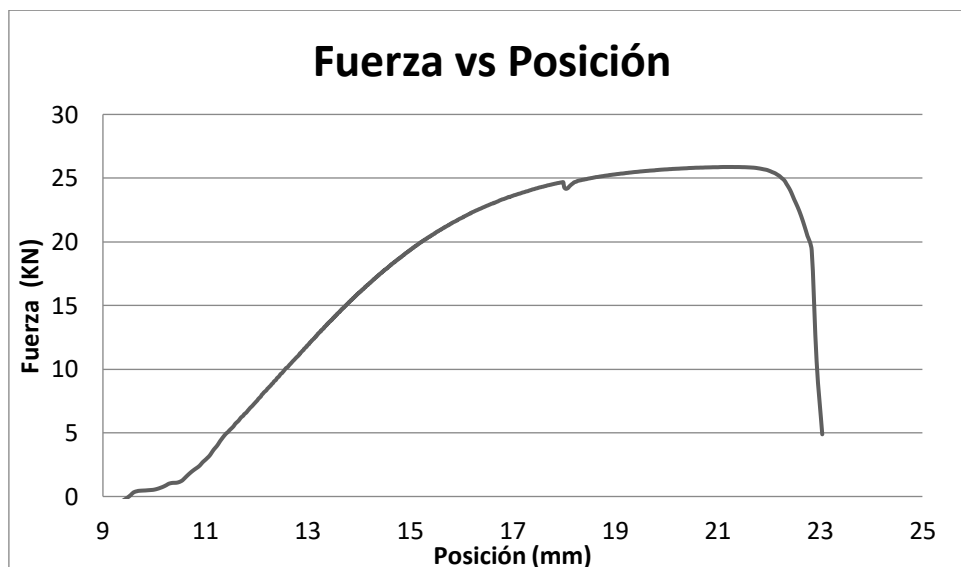
Carga Máxima (KN)

39,83

4.1.3 ENSAYOS PROBETAS MATERIAL TREFILADO.

4.1.3.1 MUESTRA MATERIAL TREFILADO 1

Referencia 3.3.3.1.



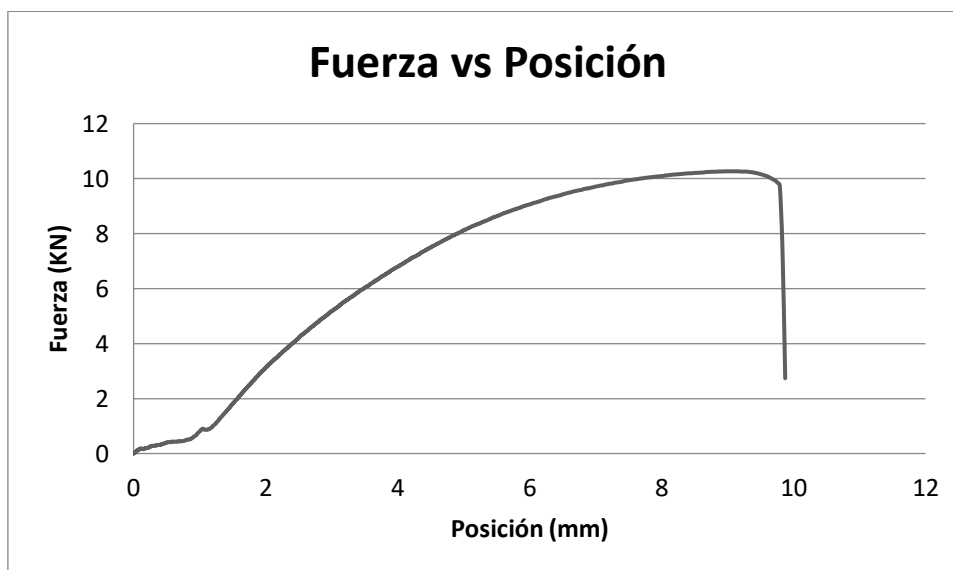
Gráfica 12. Curva tensión-deformación de la muestra de material trefilado 1

Carga Máxima (KN)

25,873

4.1.3.2 MUESTRA MATERIAL TREFILADO 2

Referencia 3.3.3.2.

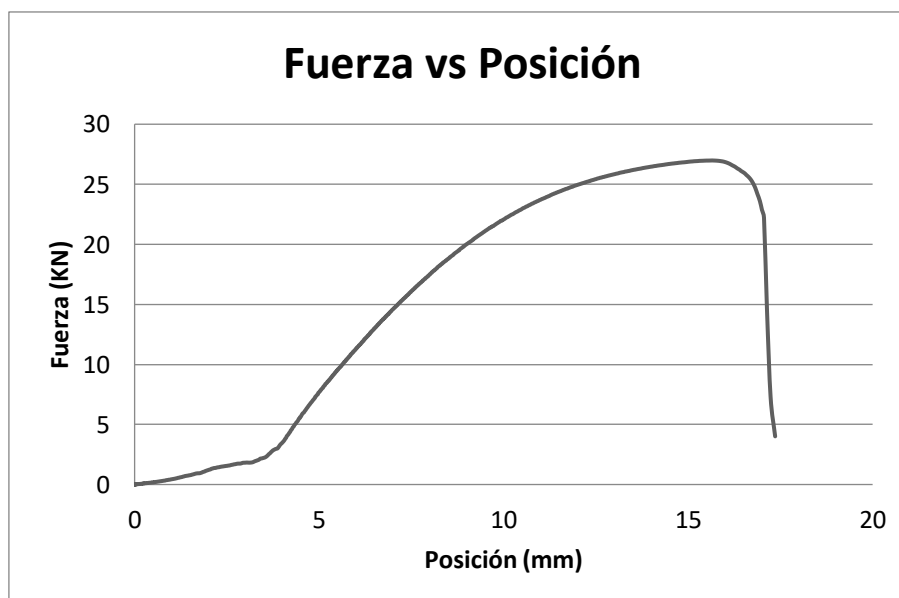


Gráfica 13. Curva tensión-deformación de la muestra de material trefilado 2

Carga Máxima (kN)
10,26

4.1.3.3 MUESTRA MATERIAL TREFILADO 3

Referencia 3.3.3.3.



Gráfica 14. Curva tensión-deformación de la muestra de material trefilado 3

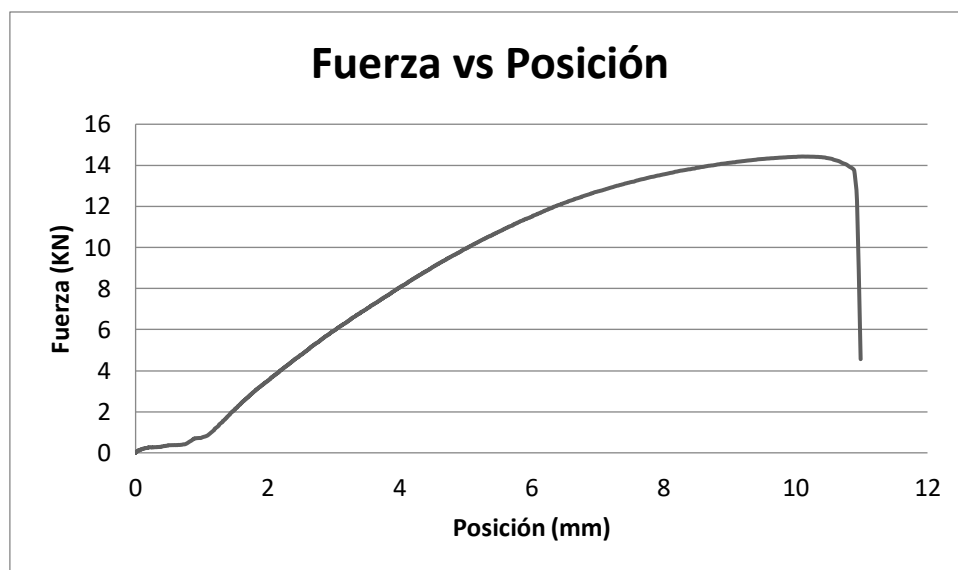
Estudio de las posibles variables a modificar para reducir las tensiones residuales durante la operación de trefilado y adopción de un sistema de medida para medir las mismas.

Carga Máxima (KN)

26,98

4.1.3.4 MUESTRA MATERIAL TREFILADO 4

Referencia 3.3.3.4.



Gráfica 15. Curva tensión-deformación de la muestra de material trefilado 4

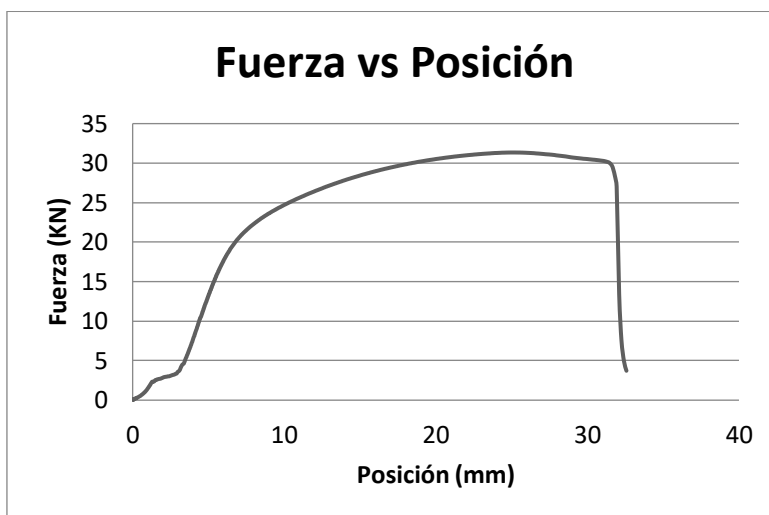
Carga Máxima (KN)

14,43

4.2 RESULTADOS MÉTODO DE REDUCCIÓN DE LAS TESIONES RESIDUALES.

4.2.1 PROCESO A

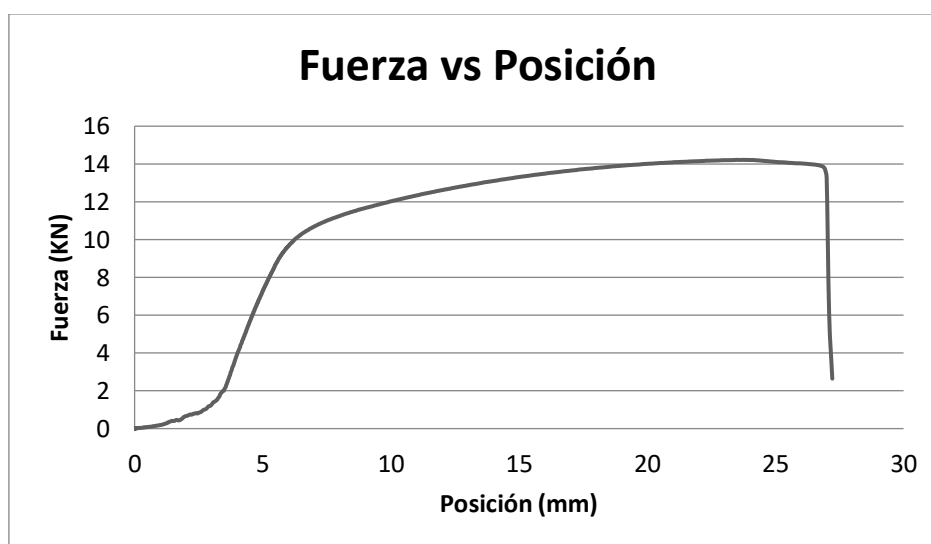
4.2.1.1 DECAPE



Gráfica 16. Curva tensión-deformación del proceso A de la muestra de material de decape.

Carga Máxima (kN)
31,34

4.2.1.2 CALDERA

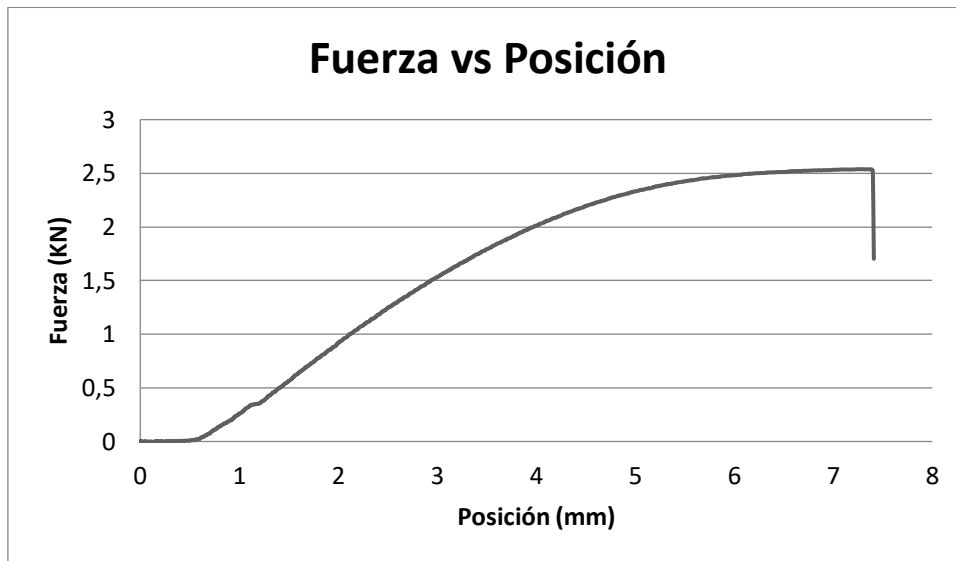


Gráfica 17. Curva tensión-deformación del proceso A de la muestra de material de caldera.

Carga Máxima (kN)
14,22

Estudio de las posibles variables a modificar para reducir las tensiones residuales durante la operación de trefilado y adopción de un sistema de medida para medir las mismas.

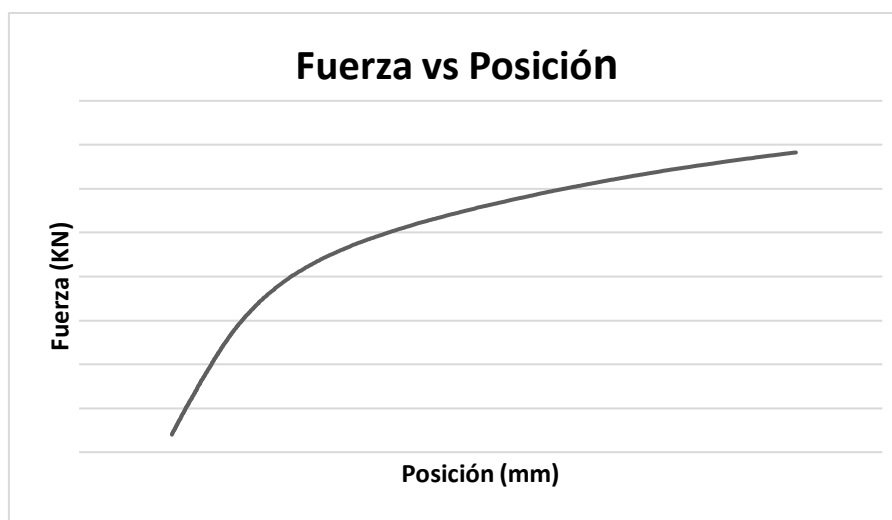
4.2.1.3 TREFILADO 0



Gráfica 18. Curva tensión-deformación del proceso A de la muestra de material de trefilado sin aplicar la variación.

Carga Máxima (KN)
2,538

4.2.1.4 TREFILADO 1



Gráfica 19. Curva tensión-deformación del proceso A de la muestra de material de trefilado tras aplicar la variación.

4.2.2 PROCESO B

4.2.2.1 DECAPE

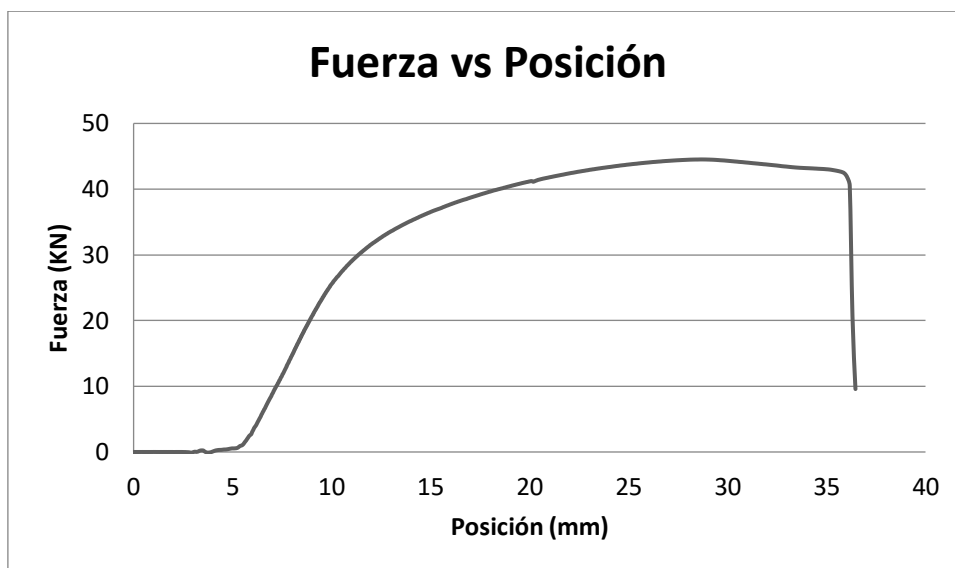


Gráfica 20. Curva tensión-deformación del proceso B de la muestra de material de decape.

Carga Máxima (kN)
39,02

4.2.2.2 CALDERA

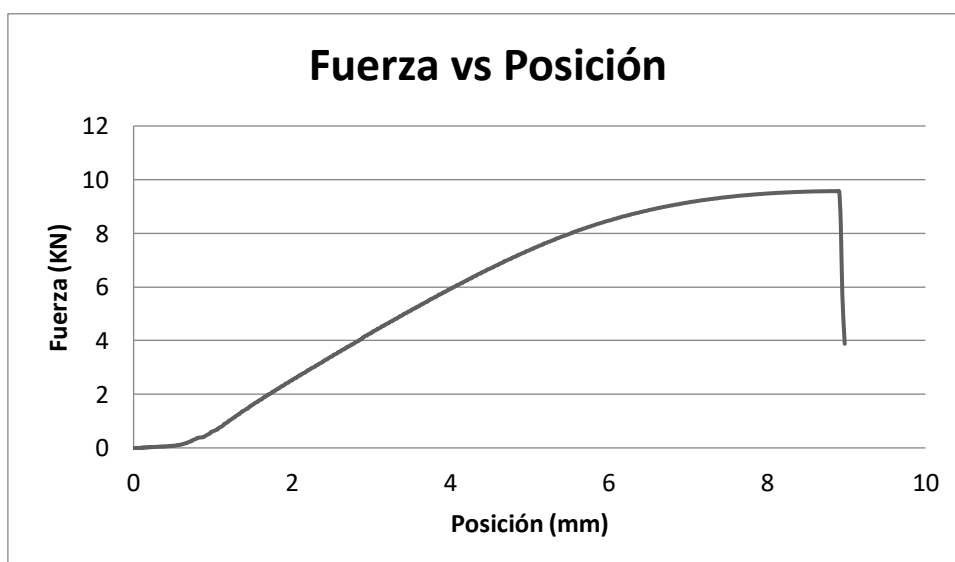
Estudio de las posibles variables a modificar para reducir las tensiones residuales durante la operación de trefilado y adopción de un sistema de medida para medir las mismas.



Gráfica 21. Curva tensión-deformación del proceso B de la muestra de material de caldera.

Carga Máxima (KN)
44,51

4.2.2.3 TREFILADO 0

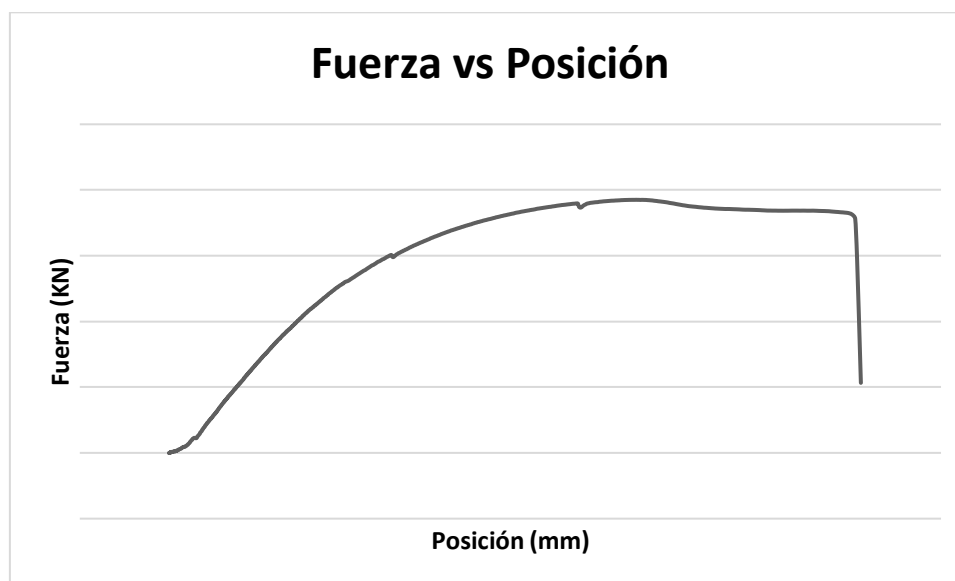


Gráfica 22. Curva tensión-deformación del proceso B de la muestra de material de trefilado sin aplicar la variación.

Carga Máxima (KN)

9,571

4.2.2.4 TREFILADO 1

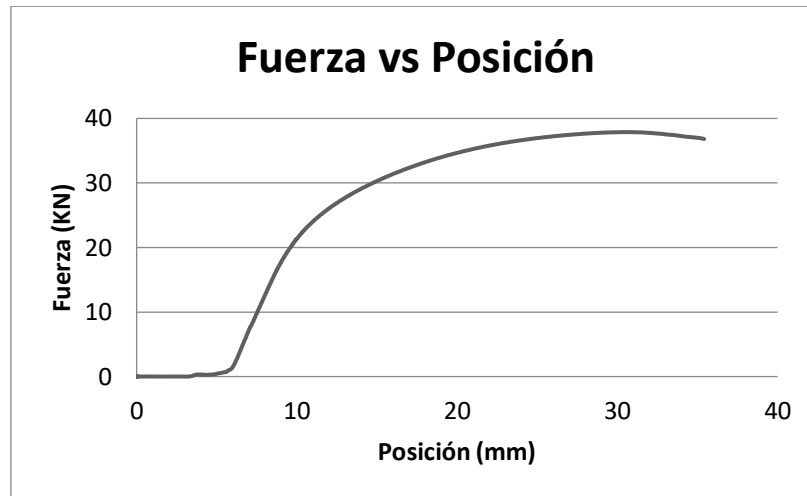


Gráfica 23. Curva tensión-deformación del proceso B de la muestra de material de trefilado tras aplicar la variación.

4.2.3 PROCESO C

4.2.3.1 CALDERA

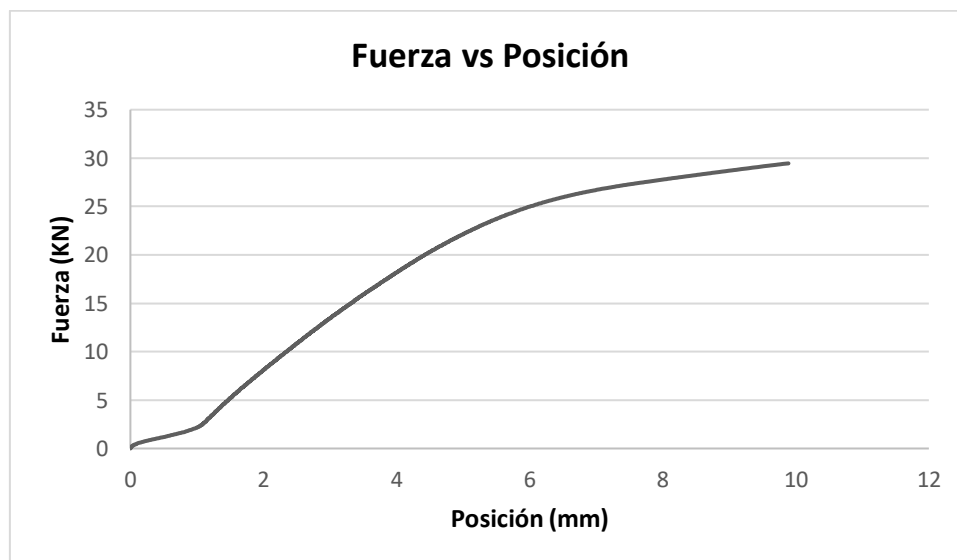
Estudio de las posibles variables a modificar para reducir las tensiones residuales durante la operación de trefilado y adopción de un sistema de medida para medir las mismas.



Gráfica 24. Curva tensión-deformación del proceso C de la muestra de material de caldera.

Carga Máxima (KN)
37,88

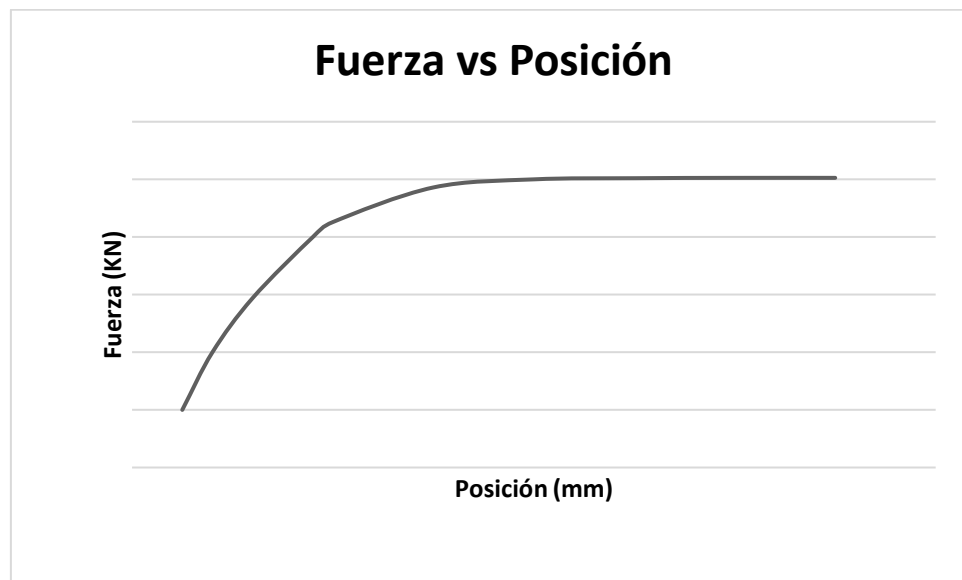
4.2.3.2 TREFILADO 0



Gráfica 25. Curva tensión-deformación del proceso de la muestra de material de trefilado sin aplicar la variación.

Carga Máxima (KN)
29,45

4.2.3.3 TREFILADO 1



Gráfica 26. Curva tensión-deformación del proceso C de la muestra de material de trefilado tras aplicar la variación.

Estudio de las posibles variables a modificar para reducir las tensiones residuales durante la operación de trefilado y adopción de un sistema de medida para medir las mismas.

5 ANÁLISIS DE RESULTADOS

El apartado de resultados se divide en las dos partes objeto de estudio del proyecto, por un lado, estudiar el método de medición de tensiones residuales (4.1.) y por otro comprobar la eficacia del método elegido para reducir las tensiones durante el proceso de trefilado (4.2.).

5.1 ANÁLISIS DEL MÉTODO DE MEDICIÓN

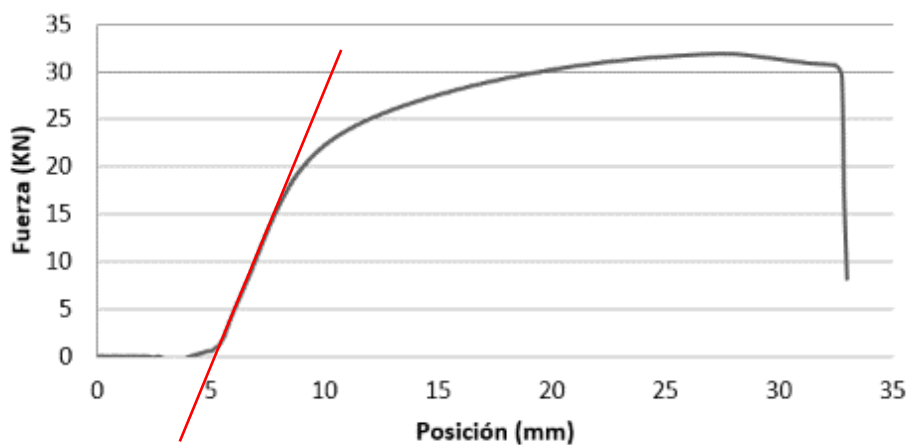
Para comprobar la eficacia del método de medición se han seleccionado probetas de 3 etapas distintas dentro del proceso productivo.

5.1.1 MUESTRAS DE PATENTADO

Las primeras probetas analizadas han sido aquellas que salen del proceso de patentado de la caldera, de las cuales se sabe que carecen de tensiones residuales o que son mínimas debido al proceso de patentado.

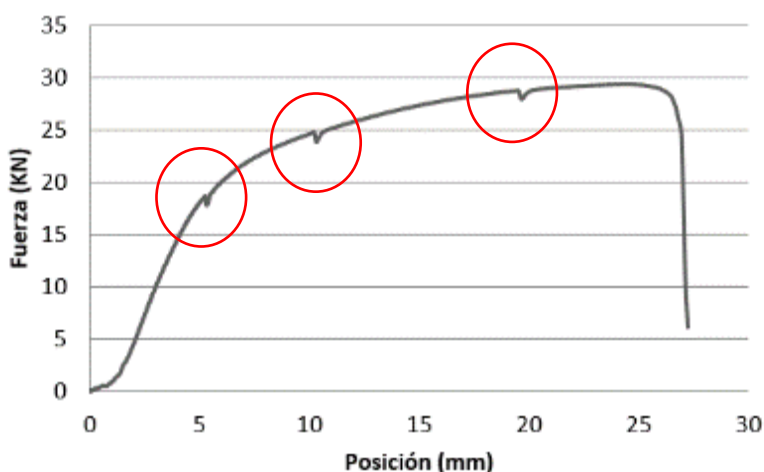
En este caso se han estudiado un total de nueve muestras, en las cuales se ha obtenido en todas ellas el resultado esperado, en el que se observa con claridad que no contienen tensiones residuales o que son prácticamente despreciables.

Estos resultados se han comparado respecto a lo expuesto en el apartado 2.3.3.1.



Gráfica 27. Curva tensión-deformación en la que se aprecia la linealidad de la zona de la curva antes de que el material comience a plastificar.

De manera general se observa que en los nueve casos las gráficas arrojan el mismo resultado, en el cual la curva de tensión deformación sigue una cierta linealidad hasta que el material comienza a plastificar.



Gráfica 28. Curva tensión-deformación en la que se aprecian los picos producidos en la misma debido al desgaste de las mordazas.

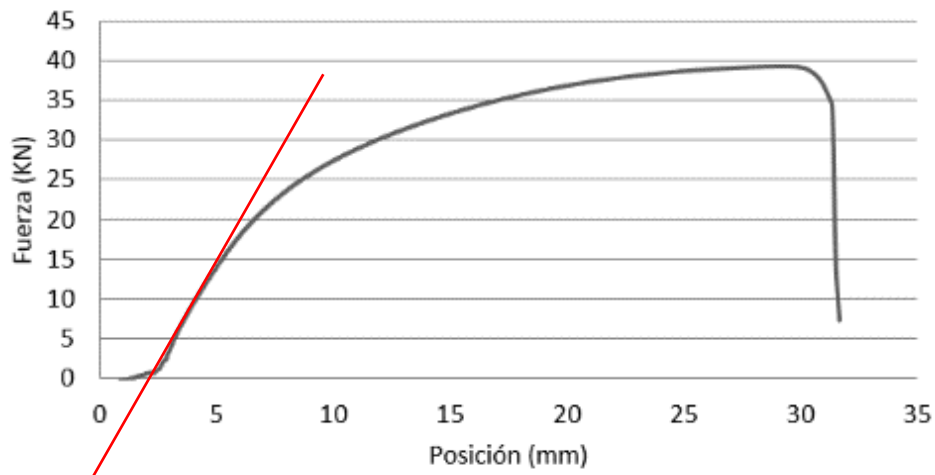
En algunos casos aparecen en las gráficas estos picos, que se deben al desgaste de las mordazas, ya que al no agarrar bien se salta la muestra del amarre y hace que aparezcan estos picos.

5.1.2 MUESTRAS SIN PATENTAR

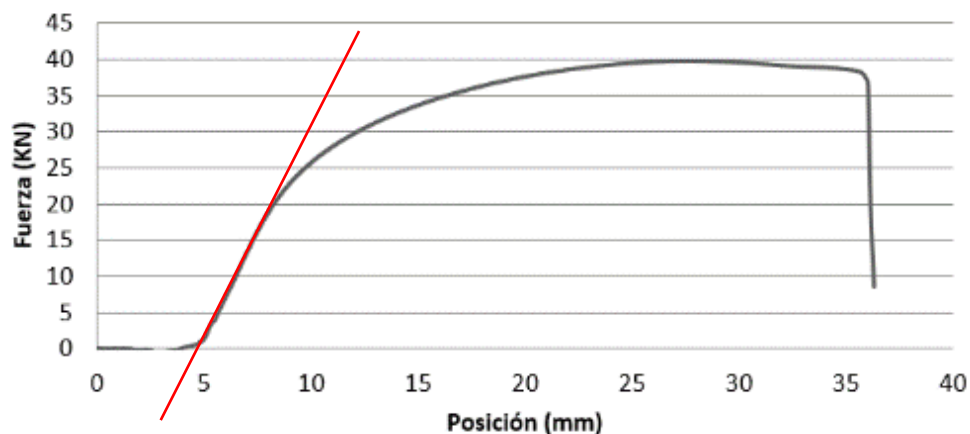
De estas muestras no se sabe con seguridad el resultado esperado, debido a que como no pasan por el proceso de patentado tendrán las tensiones residuales procedentes de la línea de decape.

Esta vez se han tomado dos muestras obteniéndose dos resultados similares.

Estudio de las posibles variables a modificar para reducir las tensiones residuales durante la operación de trefilado y adopción de un sistema de medida para medir las mismas.



Gráfica 29. Curva tensión-deformación en la que se aprecia la linealidad de la zona de la curva antes de que el material comience a plastificar.



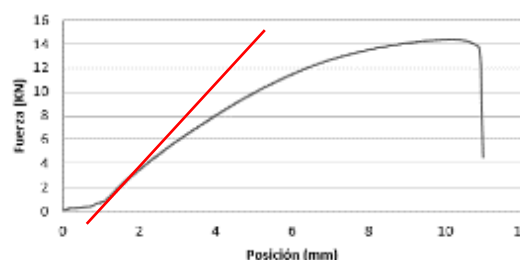
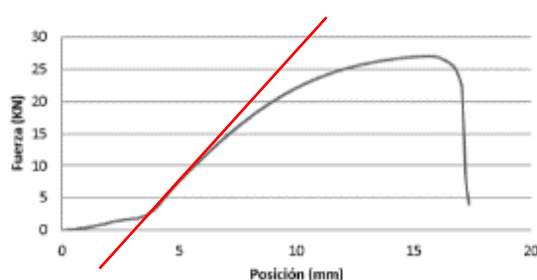
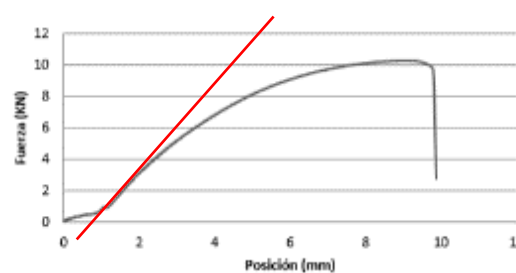
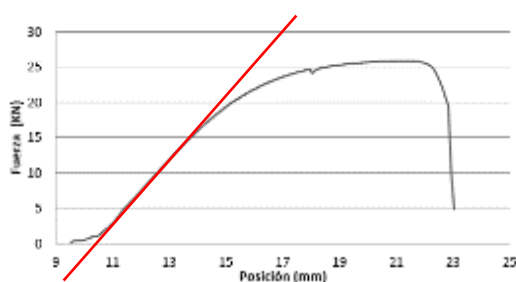
Gráfica 30. Curva tensión-deformación en la que se aprecia la linealidad de la zona de la curva antes de que el material comience a plastificar.

En el primer caso la línea recta es común a la curva en un tramo menor que en el segundo, podemos afirmar que en este caso se tienen más tensiones residuales que en las muestras que tienen proceso de patentado, aunque durante el proceso anterior tampoco se ha producido una aparición excesiva de tensiones residuales en la superficie del alambre.

5.1.3 MATERIAL TREFILADO

Para analizar estas probetas de material que ya ha sido trefilado en máquina se han tomado un total de cuatro muestras. De este material ensayado se espera con una alta probabilidad que contenga tensiones residuales las cuales se habrán generado durante el proceso de trefilado en máquina.

La magnitud de las tensiones o la cantidad de las mismas dependerá de las condiciones de trabajo con las que se haya operado y de la máquina en la que se haya fabricado.



Como se observa en las cuatro gráficas apenas se observa linealidad al comienzo de la curva hasta que el material comienza a plastificar.

Este era el resultado esperado, ya que como hemos mencionado anteriormente este material contiene tensiones residuales lo que hace que la linealidad al comienzo de la gráfica sea prácticamente inexistente.

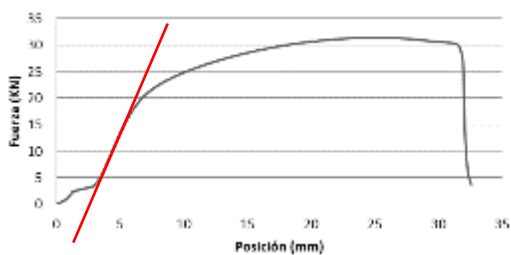
5.2 ANÁLISIS DEL MÉTODO DE REDUCCIÓN DE TENSIONES RESIDUALES

En este apartado vamos a analizar los resultados del método de reducción elegido para eliminar o disminuir las tensiones residuales durante el proceso de trefilado.

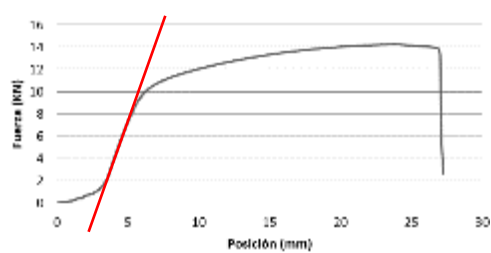
5.2.1 PROCESO A

Estudio de las posibles variables a modificar para reducir las tensiones residuales durante la operación de trefilado y adopción de un sistema de medida para medir las mismas.

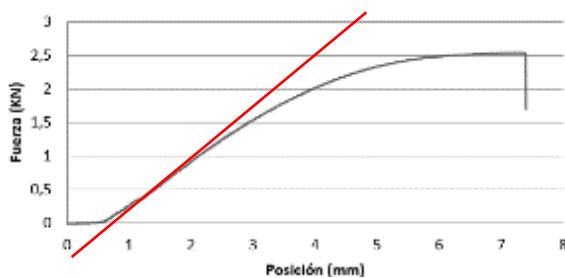
DECAPE



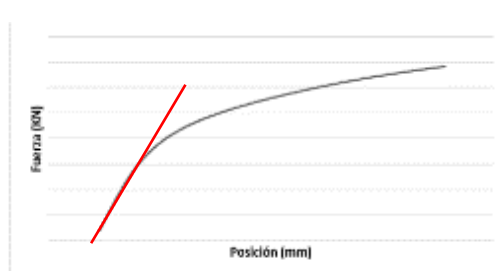
CALDERA



TREFILADO 0

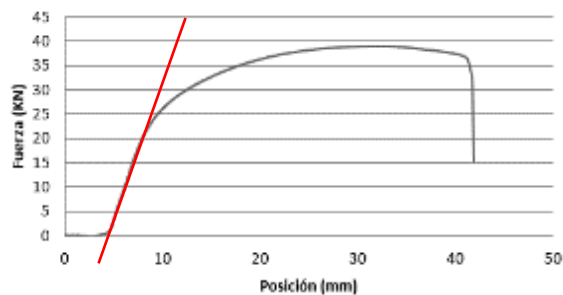


TREFILADO 1

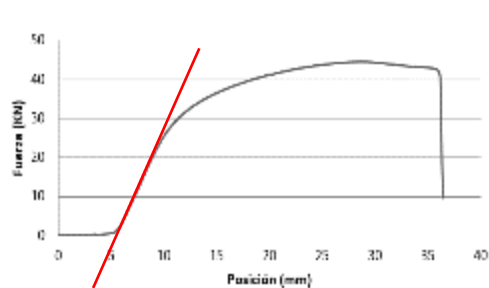


5.2.2 PROCESO B

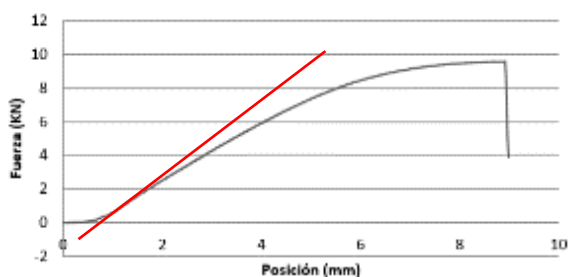
DECAPE



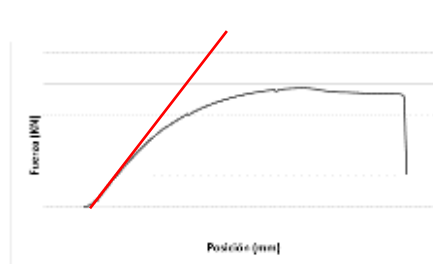
CALDERA



TREFILADO 0

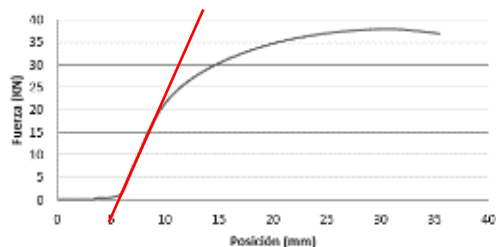


TREFILADO 1

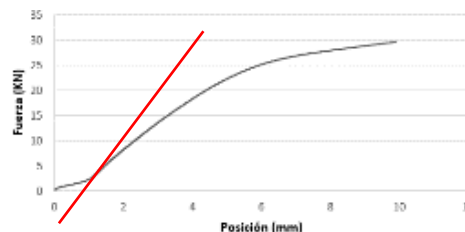


5.2.3 PROCESO C

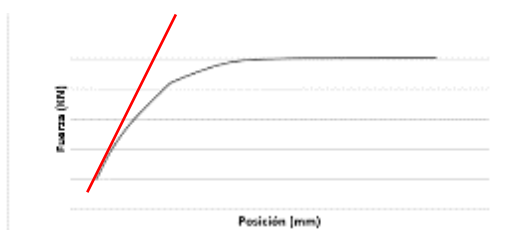
CALDERA



TREFILADO 0



TREFILADO 1



Tras analizar los resultados obtenidos de estos tres procesos se puede deducir lo siguiente:

- Tras pasar el material por la línea de decape, las muestras que han sido analizadas no tienen tensiones residuales, en esta etapa del proceso no tienen porque varíase las tensiones y por lo tanto el perfil de tensiones que presente vendrá determinado por procesos anteriores. En el proceso C no se tienen datos de la línea de decape, lo que no quiere decir que el material no haya pasado por esa etapa del proceso.
- Las muestras de la caldera tampoco presentan tensiones residuales al igual que en los casos anteriores, en estos tres casos el material ha sido patentado por lo que no hay tensiones residuales o son mínimas.
- En el caso de las muestras trefiladas aparecen distintos resultados. Como se ha explicado anteriormente el trefilado 0 es aquel en el que se opera con ángulos de entrada de la hilera de 9-12°, por otro lado el trefilado 1 se refiere a las muestras del material en las que se han variado los ángulo de entrada de la hilera de 3-4°.
- Las muestras del trefilado 0 en todos los procesos aparecen con tensiones residuales y además estas aparecen de manera notable, aunque se trata de distintos diámetros y distintas calidades.

Estudio de las posibles variables a modificar para reducir las tensiones residuales durante la operación de trefilado y adopción de un sistema de medida para medir las mismas.

- Los resultados arrojados por el material tras el trefilado 1 reflejan de forma apreciable una mejora, en cuanto a reducción de tensiones residuales respecto al trefilado 0.
- En el trefilado 1 se obtiene una resistencia similar a la del trefilado 0, como es de esperar no se trata de una resistencia idéntica pudiendo variar esta entre $\pm 1 \text{ Kg/mm}^2$.
- En ambos trefilados respecto a la muestra de la caldera se aprecia de manera considerable un aumento de ganancia de resistencia, lo que afirma la aplicación del trefilado que es precisamente el objetivo del mismo.

6 CONCLUSIONES

Tras plantear el trabajo como búsqueda de una solución para reducir las tensiones residuales durante el proceso de trefilado se plantean dos situaciones, en primer lugar, se debe encontrar un sistema de medición para constatar la existencia o no de esas tensiones y por otro lado se debe de aportar una variación durante el proceso capaz de reducir dichas tensiones residuales.

Es por esto por lo que, se plantea el trabajo como la búsqueda de la solución a dos problemas distintos en primer lugar encontrar un método de medición adecuado y por otro aportar un método para reducir las tensiones residuales durante la etapa de trefilado.

En lo que respecta al sistema de medición se han valorado diferentes opciones y finalmente se ha elegido aquella que tiene un mayor número de ventajas en el marco económico, en la disponibilidad y en la rapidez con la que se consiguen los resultados.

A partir de esta elección se ha decidido valorar la eficacia de este método por lo que se realizaron ensayos de muestras en tres escenarios diferentes en los que se conocía a priori el resultado que se debía obtener. Esto se decidió hacer de esta manera porque se consideró que lo mejor para realizar una valoración era conocer de antemano la solución.

Tras realizar los ensayos de estas muestras se obtuvieron los valores esperados y además se considera que estos son fáciles de interpretar por lo que se ha aprobado como método de medición para determinar la existencia de tensiones residuales el ensayo a tracción.

Este sistema de medición no proporciona un valor cuantitativo de las tensiones residuales, pero nos asegura de manera sencilla la existencia o no de las mismas.

Después de acordar y aprobar el método de medición de empleado, ya se puede valorar a partir de este la eficacia de la variación escogida para reducir tensiones, es decir el segundo problema y principal que se plantea.

Respecto a la problemática principal que se plantea, se han obtenido de igual manera unos resultados positivos.

Para poder comprobar la validez de la variación aplicada durante el proceso de trefilado, se ha decido estudiar el proceso completo del material desde que entra hasta que sale de las instalaciones.

Estudio de las posibles variables a modificar para reducir las tensiones residuales durante la operación de trefilado y adopción de un sistema de medida para medir las mismas.

Los resultados arrojados por las muestras de la línea de decape y de la caldera eran los resultados esperados ya que estos últimos además habían sido estudiados previamente en el anterior apartado.

Durante la etapa de trefilado del material como producto acabado se han tomado dos muestras, en primer lugar, una muestra del material después de trefilar con los ángulos de entrada comúnmente utilizados y en segundo lugar una muestra con la variación aplicada en los ángulos de entrada de la hilera.

La muestra del trefilado 0 muestra con claridad la existencia de tensiones residuales, sin embargo, la muestra ensayada del trefilado 1 refleja una curva en la que se aprecia una disminución de las tensiones residuales respecto a la muestra 0.

Lo anteriormente descrito se ve reflejado en los tres procesos estudiados por lo que se puede concluir lo siguiente:

- La variación elegida “Disminución del ángulo de entrada de la hilera” es favorable en el estudio realizado, se ve de forma notable una disminución de las tensiones residuales.
- El método de variación refleja un resultado positivo en los tres procesos estudiados los cuales poseen distintos diámetros del material y distintas calidades, por que se puede afirmar que este método es válido para reducir tensiones.
- Aunque el método de variación consiga disminuir las tensiones residuales, no se puede concretar de forma inequívoca que la disminución sea suficiente para resolver el problema planteado por el cliente, ya que el método de medición no nos da un valor de cuantía de esas tensiones.

7 BIBLIOGRAFÍA

1. *Steel fasteners failure by hydrogen embrittlement*. **FERRAZ, TERESA y OLIVEIRA, MANUELA**. 1/2, Lisboa : Ciencia e Tecnologia dos Matheriais, 2008, Vol. 20.
2. *Evaluation of new cold forging lubricans without zinc phosphate precoat*. **Gariety, Mark, Ngaile, Gracious y Altan, Taylan**. North Carolina State : International Journal of Machine Tools & Manufacture, 2006, Vol. 47.
3. **Fernández, Miguel Ángel Lorenzo**. *Influencia de las tensiones y deformaciones residuales en la fragilización por hidrógeno de acero eutectoide trefilado*. Salamanca : Universidad de Salamanca, 2009.
4. *Control de las tensiones residuales como herramienta de mejora de los alambres de pretensado*. **Atienza, J.M., Ruiz-Hervías, J. y Elices, M.** 25, Madrid : Anales de mecánica de la fractura, 2008, Vol. 1.
5. *Influence of residual stresses on hydrogen embrittlement of cold drawn wires*. **Elices, M., Ruiz, J. y Atienza, J.M.** 37, Madrid : Materials and structures, 2004.
6. *Control de las tensiones residuales como herramienta de mejora de los alambres de pretensado*. **Atienza, J.M., Ruiz-Hervías, J. y Elices, M.** Madrid : Anales de la mecánica de fractura, 2008.
7. *Influence of residual stresses in the stress relaxation of cold drawn wires*. **Atienza, J.M. y Elices, M.** 37, Madrid : Materials and structures, 2004.
8. **Granada, Andres Amador García**. *Medición de tensiones residuales*. Barcelona : Departamento de expresión gráfica en la ingeniería, 2015.
9. **Riera, Jose Miguel Atienza**. *Tensiones residuales en alambres de acero trefilado*. Madrid : Departamento de ciencia de materiales, 2001.
10. **Quijano, Jose Antonio Mazarrasa**. *Tecnología del trefilado*. Los Corrales de Buelna : s.n.
11. **Reda, Luis**. *Introducción al proceso de trefilación*. s.l. : Instituto argentino de siderurgia .
12. **Rodero, Gorka García**. *Alivio de tensiones residuales: Tratamiento térmico vs. Vibración*. 2014.

Estudio de las posibles variables a modificar para reducir las tensiones residuales durante la operación de trefilado y adopción de un sistema de medida para medir las mismas.

8 ANEXOS

8.1 EVALUACIÓN DE RIESGOS GENERALES EN LOS LUGARES DE TRABAJO

En los lugares de trabajo en los que se lleva a cabo el trefilado del acero, la actividad se realiza en el interior de las naves y en el exterior.

Entendemos por lugar de trabajo los lugares del centro de trabajo, ya estén edificadas o no, donde los trabajadores deban permanecer o a las que puedan acceder por razón de su trabajo. Están incluidos en esta definición los servicios higiénicos y locales de descanso, los locales de primeros auxilios y los comedores.

8.1.1 RIESGOS LABORALES Y SUS CAUSAS

RIESGOS	CAUSAS
<ul style="list-style-type: none"> Caída de personas a distinto nivel. 	<ul style="list-style-type: none"> Existencia de escaleras con lados abiertos o aberturas sin proteger.
<ul style="list-style-type: none"> Caída de personas al mismo nivel. 	<ul style="list-style-type: none"> Suelo irregular o resbaladizo. Falta de orden y limpieza. Iluminación insuficiente.
<ul style="list-style-type: none"> Caída de objetos por despiome o demumbamiento. 	<ul style="list-style-type: none"> Falta de resistencia de los elementos en los que se realiza el almacenamiento o el traslado de cargas. No asegurar la estabilidad, así como falta de control y revisión de los elementos en los que se realiza el almacenamiento o el traslado de cargas.
<ul style="list-style-type: none"> Caída de objetos desprendidos. 	<ul style="list-style-type: none"> Almacenamientos incontrolados. Falta de elementos de protección en zonas de cargas en movimiento.
<ul style="list-style-type: none"> Pisadas sobre objetos. 	<ul style="list-style-type: none"> Falta de orden y limpieza. Iluminación insuficiente.
<ul style="list-style-type: none"> Choques contra objetos móviles. 	<ul style="list-style-type: none"> Ausencia de protecciones o señalización. Espacios de trabajo insuficientes.
<ul style="list-style-type: none"> Choques contra objetos inmóviles. 	<ul style="list-style-type: none"> Separación insuficiente de espacios de trabajo y elementos materiales. Iluminación insuficiente. Zonas de paso con obstáculos.
<ul style="list-style-type: none"> Exposición a temperaturas ambientales extremas. 	<ul style="list-style-type: none"> Instalaciones no climatizadas, en trabajos en el interior. Falta de ropa de trabajo adecuada contra el frío o el calor, en trabajos en el exterior.
<ul style="list-style-type: none"> Contactos eléctricos. 	<ul style="list-style-type: none"> Defectos en la instalación eléctrica. Falta de cumplimiento de normas de seguridad.
<ul style="list-style-type: none"> Explosiones. 	<ul style="list-style-type: none"> Falta de mantenimiento y comprobación de los equipos. Falta de cumplimiento de normas de seguridad.
<ul style="list-style-type: none"> Incendios. 	<ul style="list-style-type: none"> Inexistencia o insuficiencia de medios de lucha contra el fuego. Falta de conservación o mantenimiento de los equipos e instalaciones. Negligencias o descuidos.
<ul style="list-style-type: none"> Exposición a contaminantes biológicos. 	<ul style="list-style-type: none"> Falta de conservación, mantenimiento y limpieza de las instalaciones, en general y de los sistemas de ventilación y climatización, en particular.
<ul style="list-style-type: none"> Ruido. 	<ul style="list-style-type: none"> Falta de aislamiento de procesos, instalaciones o equipos. Fallos en la conservación y mantenimiento de los mismos.

8.2 MEDIDAS GENERALES DE PROTECCIÓN EN MÁQUINAS

Se llama equipo de trabajo a cualquier máquina, aparato, instrumento o instalación utilizado en el trabajo. Dentro del sector del trefilado de acero, la actividad se realiza gracias a la ayuda de equipos de trabajo, como trefiladoras, hornos, carretillas elevadoras, puentes grúa, etc. Dichos equipos agilizan en buena medida el trabajo a desarrollar, no hay que olvidar que pueden originar directa o indirectamente riesgos laborales, por no incorporar las debidas medidas de seguridad, por obviarlas o anularlas, por mantenimientos inadecuados, por falta de formación de los operarios en su uso, etc.



Figura 26. Máquina de trefilar con las protecciones necesarias para evitar impacto del alambre durante el trefilado.

8.2.1 RIESGOS LABORALES Y SUS CAUSAS

Estudio de las posibles variables a modificar para reducir las tensiones residuales durante la operación de trefilado y adopción de un sistema de medida para medir las mismas.

RIESGOS	CAUSAS
<ul style="list-style-type: none"> Riesgos mecánicos. Es el conjunto de factores físicos que pueden dar lugar a una lesión por la acción mecánica de elementos de máquinas, herramientas, piezas a trabajar o materiales proyectados, sólidos o fluidos. Pueden ocasionar: aplastamiento, corte, atrapamiento, proyecciones... 	<ul style="list-style-type: none"> Partes o piezas de la máquina con aristas cortantes, partes agudas, etc. Elementos móviles sin resguardo o sin dispositivos de protección. Inexistencia de pantallas protectoras, en la máquina que protejan al operario de posibles proyecciones.
<ul style="list-style-type: none"> Riesgo eléctrico (cortocircuito, choque eléctrico) 	<ul style="list-style-type: none"> Mantenimiento incorrecto Aislamientos inadecuados.
<ul style="list-style-type: none"> Riesgo térmico (quemaduras, incendios) 	<ul style="list-style-type: none"> No estar limitado el acceso a superficies calientes, mediante la colocación de resguardos protectores. Incorrecta manipulación de los equipos de trabajo. Falta de señalización de las condiciones térmicas (alta o baja temperatura) de conducciones, recipientes, aparatos...
<ul style="list-style-type: none"> Ruido 	<ul style="list-style-type: none"> Falta de aislamiento de la fuente generadora del ruido. Mantenimiento inadecuado de la maquinaria.
<ul style="list-style-type: none"> Radiaciones 	<ul style="list-style-type: none"> Diseño inadecuado de la instalación, por falta de aislamiento de la fuente de emisión.
<ul style="list-style-type: none"> Vibraciones 	<ul style="list-style-type: none"> Mantenimiento inadecuado de la maquinaria. Inexistencia de materiales aislantes (resortes metálicos, soportes de caucho, etc.) o de materiales absorbentes de las vibraciones. Por inestabilidad de los equipos de trabajo.
<ul style="list-style-type: none"> Higiénico 	<ul style="list-style-type: none"> Diseños de los equipos inadecuados. Inexistencia de sistemas de extracción. Falta de mantenimiento y limpieza.

8.3 EVALUACIÓN DE LA EXPOSICIÓN AL RUIDO

El ruido es un factor que puede tener una repercusión significativa sobre la salud de los trabajadores. La exposición diaria a altos niveles de ruido no sólo tiene efectos dañinos a medio-largo plazo, provocando una disminución de la capacidad auditiva, sino que, además, un ambiente de trabajo ruidoso puede producir pérdidas de concentración por parte de los afectados, cansancio e irritabilidad, incidiendo sobre el rendimiento del trabajador y la calidad del trabajo realizado. Por ello, es importante definir medidas que traten de reducir los niveles de ruido existentes en el lugar de trabajo, así como los que son percibidos por el trabajador.

En el sector del trefilado del acero se utiliza, en mayor o menor medida, diversa maquinaria que puede generar altos niveles de ruido, acentuándose este hecho por su operación simultánea. Es necesario, en primer lugar, conocer cuáles son esos niveles de ruido a los que están expuestos los trabajadores y, en segundo lugar, qué incidencia tienen sobre los mismos.

8.4 HERRAMIENTAS MANUALES

Las herramientas manuales tales como tijeras o cuchillas, martillos, cortafríos, llaves o destornilladores son utilizadas en el sector del trefilado del acero, principalmente durante las operaciones de mantenimiento y limpieza de piezas y equipos.

Aunque su uso suele ser sencillo, no requiriendo la adopción de pautas complejas de manejo, dan lugar a un número elevado de accidentes laborales, en su mayoría de carácter leve.

Se hace por tanto necesaria la adopción de ciertas precauciones y medidas preventivas básicas en su uso, en su elección, su transporte y mantenimiento.

8.4.1 RIESGOS LABORALES Y SUS CAUSAS

RIESGOS	CAUSAS
• Golpes y cortes en manos.	• Provocados por el contacto con la herramienta o con la pieza a trabajar.
• Proyección de partículas (lesiones oculares).	• Procedentes de los objetos que se trabajan o de la propia herramienta.
• Sobreesfuerzos.	• Por gestos violentos o malas posturas durante la realización del trabajo.

8.5 MANIPULACIÓN DE LAS CARGAS

Dentro del sector del trefilado del acero es común la manipulación y el movimiento de cargas, principalmente durante la operación de carga y descarga de los carretes y las bobinas.

Las causas de estos sobreesfuerzos son la manipulación manual de cargas, al depositar las cargas en el guiado manual, movimientos bruscos o inadecuados, posturas forzadas o incorrectas al clasificar o coger el material, etc.

La manipulación manual de cargas puede producir tanto fatiga física, como lesiones que se pueden manifestar de una forma inmediata o por acumulación de pequeños traumatismos, aparentemente sin importancia.

Las lesiones más frecuentes son entre otras: contusiones, cortes, heridas, fracturas y sobre todo lesiones musculares. Estas se pueden producir en cualquier zona del cuerpo, pero son más sensibles en los miembros superiores y la espalda, en especial la zona dorso lumbar.

También se pueden producir lesiones en los miembros superiores, tales como hombros brazos y manos; heridas o arañazos producidos por esquinas demasiado afiladas,

contusiones por caídas de la carga; problemas circulatorios o hernias inguinales y potros daños producidos por derramamiento de sustancias peligrosas.

8.5.1 RIESGOS LABORALES Y SUS CAUSAS

Estudio de las posibles variables a modificar para reducir las tensiones residuales durante la operación de trefilado y adopción de un sistema de medida para medir las mismas.

FACTORES DE RIESGO	CAUSAS
<ul style="list-style-type: none"> • Por las características de la carga 	<ul style="list-style-type: none"> • Carga demasiado grande o demasiado pesada • Carga voluminosa o difícil de sujetar • Peligro de desplazamiento de la carga o su contenido • Necesidad de levantar o sostener separada del cuerpo la carga, para su manipulación • La forma exterior de la carga puede producir lesiones al trabajador • La superficie de la carga (bordes cortantes, resbaladiza, caliente o fría, etc.)
<ul style="list-style-type: none"> • Por el esfuerzo físico necesario para su manipulación 	<ul style="list-style-type: none"> • Esfuerzo necesario demasiado importante para levantar o mover la carga • El esfuerzo ha de hacerse necesariamente doblando o girando el cuerpo • El esfuerzo se realiza mientras el cuerpo está en posición inestable • Para levantar o descender la carga se ha de modificar la sujeción de ésta
<ul style="list-style-type: none"> • Por las características del medio o lugar de trabajo 	<ul style="list-style-type: none"> • Espacio insuficiente para manipular la carga • Suelo inestable o irregular dando lugar a tropezones o resbalones • Imposibilidad de manipulación a una altura segura y postura correcta • Existencia de desniveles en el suelo • Inadecuadas condiciones de temperatura, humedad y/o circulación del aire • Iluminación insuficiente • Vibraciones
<ul style="list-style-type: none"> • Por las exigencias de la actividad 	<ul style="list-style-type: none"> • Exigencias de esfuerzos físicos frecuentes y prolongados • Ritmo de actividad no controlable por el individuo • Periodos de descanso insuficientes • Distancias de transporte, elevación o descenso muy largas
<ul style="list-style-type: none"> • Por los factores de riesgo individuales del trabajador 	<ul style="list-style-type: none"> • Cuando el trabajador carece de la suficiente capacidad física • Cuando el trabajador no lleve una ropa adecuada (por ejemplo las prendas de protección completas pueden entorpecer movimientos, los guantes pueden afectar a la correcta sujeción, las gafas o máscaras pueden afectar a la visibilidad, etc.) • Cuando no posea una formación o experiencia suficiente • Cuando el trabajador padezca algún tipo de lesión de espalda o esté en periodo de convalecencia de algún proceso patológico anterior
<ul style="list-style-type: none"> • Por la manera de transportar la carga 	<ul style="list-style-type: none"> • Espalda encorvada, en este caso la columna se desvía, los músculos quedan sometidos a una fuerte tracción y, las vértebras y los discos quedan bajo una sobrepresión • Cuando la carga se coge de forma brusca puede haber pérdida de equilibrio y resbalones
<ul style="list-style-type: none"> • Por la descarga de cargas 	<ul style="list-style-type: none"> • Cuando el tronco se torsiona en la descarga • Cuando los materiales que se transportan no van sujetos de manera adecuada

8.6 RIESGO ELÉCTRICO

Actualmente el riesgo eléctrico está presente en prácticamente todos los sectores de actividad, al ser la electricidad un recurso natural esencial en el que hacer y como ha de ser objeto de estudio, examinando los riesgos y medidas preventivas.

El problema de la energía eléctrica es que la electricidad no se ve, ni se oye, ni se huele, a diferencia de otros factores de riesgo. Por lo tanto, es preciso conocer como es la corriente eléctrica y cuáles son los medios para protegerse, ya que, utilizando adecuadamente los sistemas de seguridad, los accidentes eléctricos pueden disminuir considerablemente.

Los accidentes eléctricos, aunque no son muy numerosos, dan lugar en la mayoría de los casos, a lesiones muy graves o mortales. Las causas fundamentales son el desconocimiento, la falta de formación específica o la aparición de defectos en las instalaciones eléctricas.

El tipo de lesión más frecuente en el accidente eléctrico es la quemadura, aunque se pueden sufrir otro tipo de lesiones más serias como paro respiratorio, anulación de la

capacidad muscular, asfixia, etc. También puede llevar aparejado incendio y explosiones.

Si bien es preciso recordar que el riesgo eléctrico aumenta con la humedad, con el tiempo de contacto, con la tensión o voltaje, etc., afectando también la falta de verificación periódica tanto de la instalación eléctrica como de los equipos de trabajo que funcionan con energía eléctrica, por personal capacitado.

Como premisa fundamental frente al riesgo eléctrico está la prohibición de manipulación de cualquier instalación eléctrica por parte de personal no autorizado.

Las instalaciones eléctricas de los lugares de trabajo y las técnicas y procedimientos para trabajar en ellas, o en sus proximidades se regulan en el R.D. 614/2001, de 8 de Junio, sobre disposiciones mínimas para la protección de la salud y seguridad de los trabajadores frente al riesgo eléctrico.

8.6.1 RIESGOS LABORALES Y SUS CAUSAS

El riesgo eléctrico, se define como la posibilidad de circulación de corriente eléctrica a través del cuerpo humano.

En la materialización del riesgo eléctrico el cuerpo humano entra en contacto con un elemento conductor de tensión. Este contacto puede ser directo o indirecto.

El contacto eléctrico directo es el que se produce al entrar en contacto el cuerpo con una parte activa o en tensión de la instalación eléctrica, siendo la parte activa el conjunto de conductores y piezas conductoras bajo tensión en servicio normal: cables, clavijas, barras de distribución, bases de enchufe, etc

El contacto eléctrico indirecto tiene lugar cuando la persona entra en contacto con algún elemento que no forma parte del circuito eléctrico y que, en condiciones normales, no debería encontrarse bajo tensión, pero puede ocurrir por algún defecto.

8.7 RIESGO DE INCENDIO

El riesgo de incendio es un riesgo común en toda instalación, ya sea industrial o no, además una vez que se materializa, sus consecuencias previsibles son graves.

Estudio de las posibles variables a modificar para reducir las tensiones residuales durante la operación de trefilado y adopción de un sistema de medida para medir las mismas.

Tanto la probabilidad de ocurrencia, como la severidad de las consecuencias pueden reducirse si se equipa a la instalación de los adecuados medios de lucha contra incendios además de tomar en consideración una serie de medidas preventivas básicas.

En este sentido es preciso recordar que R.D. 486/1997 por el que se establecen las Disposiciones Mínimas de Seguridad y Salud en los Lugares de Trabajo, señala lo siguiente:

Según las dimensiones y el uso de los edificios, los equipos, las características físicas y químicas de las sustancias existentes, así como el número máximo de personas que pueden estar presentes, los lugares de trabajo deberán estar equipados con dispositivos adecuados para combatir los incendios.

En todo caso, las vías y salidas de evacuación, así como las vías de circulación que den acceso a ellas, no deberán estar obstruidas por ningún objeto de manera que puedan utilizarse en cualquier momento. Debiendo permanecer expeditas.

Por lo tanto, el mantener los medios adecuados para la protección frente al riesgo de incendio y, medidas preventivas en cuestiones como la identificación de los focos de ignición, la organización y disposición de los equipos de trabajo, el almacenamiento de sustancias químicas, la señalización de vías de evacuación y equipos de alarma y extinción son esenciales a la hora de tratar de minimizar el riesgo de incendio.

Para que se origine un incendio es necesario que se den conjuntamente los siguientes elementos:

Combustible: Puede ser cualquier material sólido, líquido o gaseoso.

Comburente: Generalmente el oxígeno del aire

Calor: Proporciona la energía necesaria para que se inicie la ignición.

Reacción: Cuando el combustible, el oxígeno y el calor se combinan en cantidades correctas y bajo condiciones apropiadas, se produce una reacción química en cadena que origina el fuego.

Estos cuatro factores constituyen el llamado triángulo de fuego en el que se representan, por tanto, las condiciones que deben darse de manera conjunta para que un fuego se inicie.

8.8 CONTAMINANTES QUÍMICOS

Prácticamente todas las empresas del sector del trefilado del acero utilizan de alguna u otra forma, productos tóxicos y peligrosos, especialmente aceites y combustibles inflamables y en menor o medida disolventes y ácidos.

El uso de estas sustancias lleva implícito una serie de riesgos para la seguridad y la salud del trabajador ya que no solo pueden llegar a producir daño en el caso de contacto directo, sino que, en muchas ocasiones, a consecuencia de su uso, se generan vapores, humos o nieblas, atmósferas de riesgo, efectos acumulativos por el contacto frecuente, etc.

Cualquier sustancia química en contacto con el organismo es capaz de producir daños si se absorbe en suficiente cantidad. La tipología y magnitud de los daños ocasionados por los productos tóxicos dependen de múltiples factores, entre los que destacan:

- Naturaleza del producto químico involucrado.
- Vía de incorporación del producto tóxico al ser humano o al medio afectado.
- Magnitud, frecuencia y duración de la dosis recibida.
- Susceptibilidad al producto químico de la persona o del medio afectado.

8.9 TRABAJO A TURNOS Y NOCTURNO

El trabajo nocturno y a turnos está cada vez más extendido por distintas razones económicas y productivas.

Desde el punto de vista de salud laboral, el trabajo a turnos debe organizarse teniendo en cuenta que se han de prevenir sus implicaciones sobre la salud de los trabajadores ya que el tiempo de trabajo es uno de los aspectos de las condiciones de trabajo que tiene una repercusión más directa sobre la vida diaria. El número total de horas trabajadas y su distribución pueden afectar no sólo a la calidad de la vida en el trabajo, sino a la vida extralaboral.

A pesar de que las alteraciones debidas al trabajo a turnos están muy estudiadas, es difícil encontrar en nuestro país, métodos validados que permitan la evaluación de estos factores.

Para realizar una evaluación de riesgos derivados del trabajo a turnos es recomendable recurrir a versiones reducidas de los métodos existentes.

La mayoría de los métodos contemplan las variables más significativas:

- Problemas de salud física y psicológica.

Estudio de las posibles variables a modificar para reducir las tensiones residuales durante la operación de trefilado y adopción de un sistema de medida para medir las mismas.

- Alteraciones de sueño.
- Dificultades en la vida familiar y social.

Es importante diseñar el trabajo a turnos de forma que sea lo menos nocivo posible para la salud del trabajador. Teniendo en cuenta las alteraciones que produce.

8.10 EQUIPOS DE PROTECCIÓN INDIVIDUAL (EPIS)

En la realización de todas las actividades propias del sector del trefilado del acero, como son las relativas al almacenamiento, clasificación y empaquetado, así como en la utilización de los distintos equipos de trabajo y herramientas descritos, puede ser necesario el uso de equipos de protección individual (EPIS) que protejan a los trabajadores de los posibles riesgos a los que están expuestos, siempre que tales riesgos no se hayan podido evitar o limitar lo suficiente utilizando medios técnicos, sistemas de producción colectiva o medidas, métodos o procedimientos establecidos en la organización del trabajo. Por tanto, en todo caso, prima la protección colectiva a la individual.

Un equipo de protección individual (EPI) es cualquier equipo destinado a ser llevado o sujetado por el trabajador para que le proteja de uno o varios riesgos que puedan amenazar su seguridad o su salud, así como cualquier complemento o accesorio destinado a tal fin.

Entre otros, se excluyen de tal definición, la ropa de trabajo corriente y los uniformes que no estén específicamente destinados a proteger la salud o la integridad física del trabajador.

El empresario está obligado a proporcionar gratuitamente a los trabajadores los equipos de protección individual que deban utilizar, reponiéndolos cuando resulte necesario.



Figura 27. Equipos de protección individual (EPI) utilizados de manera general.

8.11 SEÑALIZACIÓN DE SEGURIDAD Y SALUD

Dentro del desarrollo de la actividad preventiva es necesaria la garantía de que en los lugares de trabajo existe una adecuada señalización de seguridad y salud, siempre que los riesgos no puedan evitarse o limitarse lo suficiente a través de medios técnicos de protección colectiva o de medidas, métodos o procedimientos de organización del trabajo.

En el sector del trefilado del acero, la señalización juega un papel decisivo en la información y advertencia a los trabajadores sobre:

- Los riesgos existentes en los centros de trabajo.
- Necesidad de uso de equipos de protección individuales (EPI).
- Conductas o actividades prohibidas.
- Localización de los medios de lucha contra incendios.
- Vías de evacuación.
- Indicación de peligro o precaución por varias causas.

En cualquier caso, siempre la señalización es una medida complementaria de protección, ya que de la señalización por sí misma no elimina el riesgo.

Para conseguir la eficacia dicha señalización será, tan importante como la existencia de esta, el aseguramiento de que los trabajadores posean la formación necesaria para interpretar correctamente las señales y adoptar en consecuencia el comportamiento requerido.

Estudio de las posibles variables a modificar para reducir las tensiones residuales durante la operación de trefilado y adopción de un sistema de medida para medir las mismas.



Figura 29. Distintas señales utilizadas en el mundo laboral, clasificadas por colores según el peligro del cual advierten.

8.12 MEDIDAS DE EMERGENCIA Y PRIMEROS AUXILIOS

En las empresas dedicadas al trefilado del acero, existen riesgos que pueden provocar situaciones de emergencia, como pueden ser incendio, explosión, etc., debidos, entre otros factores, a la utilización y manipulación de productos inflamables en, en caso de mal estado o sobrecarga de la instalación eléctrica, por actos imprudentes, etc. Estas situaciones de emergencia pueden llevar aparejados daños a la seguridad y salud de las personas.

Para tener controladas estas situaciones, la propia Ley 31/1995 de Prevención de Riesgos Laborales señala en su art.20 que, el empresario deberá analizar las distintas situaciones de emergencia y adoptar las medidas necesarias en materia de primeros auxilios, lucha contra incendios y evacuación de los trabajadores designando para ello al personal encargado de poner en práctica estas medidas y comprobando periódicamente, en su caso, su correcto funcionamiento.

El citado personal deberá poseer la formación necesaria, ser suficiente en número y disponer del material adecuado, en función de las circunstancias antes señaladas.

Tanto en tales situaciones, como si cualquier trabajador sufre algún daño o accidente en el centro de trabajo, el empresario debe saber actuar de una manera organizada,

rápida y eficaz, debiendo contar para ello con los medios, tanto humanos como materiales, adecuados.